



MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

Par  
**Francis Tremblay**

**Évaluation d'une méthode de prédiction de l'usure des outils utilisés  
dans le soudage par friction-malaxage en recouvrement dans des  
assemblages dissimilaires aluminium et acier**

**Septembre 2019**

## Résumé

Le domaine du transport est en constant changement et s'adapte aux réalités d'aujourd'hui. Les progrès technologiques permettent de produire des assemblages qui sont plus légers et ainsi, de réduire la consommation énergétique des déplacements. Toutefois, les normes de sécurité au niveau de la solidité de la structure et en cas d'accident demeurent, ce qui demande l'utilisation de matériaux résistants. Construire une structure avec un seul matériau alliant légèreté et résistance n'est pas la seule option, il faut aussi tenir compte du coût d'acquisition du matériau de base et de sa mise en forme qui peuvent être importants. Il est donc logique de construire en utilisant des matériaux différents. Étant donné que le soudage par friction-malaxage (SFM) permet l'assemblage de matériaux dissimilaires, cette méthode de production est privilégiée.

Plusieurs défis techniques s'imposent donc avec l'utilisation de plus en plus massive du SFM dans des assemblages contenant des matériaux résistants. En effet, l'outil doit être fabriqué d'un matériau qui est capable de résister aux forces engendrées lors du soudage de ces matériaux. L'usure des outils est donc importante dans certains cas.

Ce travail de recherche a pour objectif principal de proposer et d'évaluer une méthode de prédiction de l'usure des outils dans des conditions d'assemblage réelles proposées par le consortium d'entreprise AlTec.

En combinant les facteurs qui influencent l'usure, une équation phénoménologique a été proposée en se basant sur la loi générale d'usure d'*Archard*. Avec plusieurs méthodes d'analyses et de prises de données, cette équation a pu être mise à l'épreuve. Ainsi, une comparaison entre les cas expérimentaux et théoriques a pu être effectuée. Les résultats de cette recherche ont été analysés et serviront à cibler les facteurs d'usure les plus dominants et à illustrer les patrons d'usure des outils.

## Remerciements

Pour commencer, j'aimerais d'abord remercier ma directrice de recherche madame Lyne St-Georges qui a cru en moi tout au long de ces trois années qu'a duré cette maîtrise. J'ai eu la chance de pouvoir être sous vos conseils et vous avez toujours été là pour me supporter et me conseiller. Je ne peux être qu'infiniment reconnaissant à votre égard et je me considère chanceux d'avoir pu profiter de vos précieux conseils et votre approche humaine.

Je veux spécialement remercier mon co-directeur de maîtrise François Nadeau pour le support technique et expérimental que tu m'as donné pendant les deux années que j'ai pu travailler avec toi. Sans toi, je n'aurais pas pu terminer. La connaissance et la passion de ton domaine m'a permis de vouloir aimer et de connaître autant le domaine dans lequel j'ai choisi d'évoluer que toi. Mes chaleureux remerciements vont aussi à l'équipe du CTA qui a rendu l'expérience de travail exceptionnelle. Tout d'abord merci Mario Patry pour ton aide et pour ta patience, j'aurai brisé pas mal plus d'outils et perdu beaucoup plus de temps sans toi. Salutations et remerciements à toute l'équipe d'analyse des échantillons, Hélène Grégoire, Geneviève Simard, Myriam Poliquin, pour votre assistance technique. En terminant, merci à Linda Bellefleur, Richard Menini et Stéphane Simard, vous êtes des exemples à suivre.

Je veux mentionner la contribution de l'UQAC à ce travail ainsi que des professeurs avec qui j'ai collaboré tout au long de mon parcours universitaire. Ils ont pu me faire profiter de leurs enseignements et de certains qui m'ont donné l'opportunité de m'introduire dans le domaine de l'enseignement universitaire.

Ce mémoire est le résultat d'un travail d'équipe. Je refuse de prendre l'ensemble des crédits personnellement. Une partie de ce travail est donc dédié aux personnes qui m'ont entourée. Merci Andréanne d'avoir été là pour moi et de m'avoir supporté. Merci à ma famille qui m'a appris à toujours voir le bon côté des choses, l'acharnement, la persévérance et de m'avoir donné les outils dans ma vie pour foncer et dépasser mes limites.

## Table des matières

Résumé .....	II
Remerciements .....	III
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux .....	XII
Abréviations .....	XV
Chapitre 1    Introduction .....	1
1.1    Généralités .....	1
1.2    Problématique.....	3
1.3    Objectifs .....	4
1.4    Méthodologie.....	5
1.5    Apport scientifique et industriel du travail .....	6
1.6    Portrait du contenu .....	7
Chapitre 2    Revue de littérature.....	8
2.1    Introduction .....	8
2.2    Le soudage par friction-malaxage de matériaux dissimilaires .....	8
2.2.1    L’outil de soudage .....	8
2.2.2    L’assemblage dissimilaire .....	10
2.2.3    Les matériaux d’assemblage.....	15
2.2.4    L’influence des paramètres opératoires.....	17
2.3    L’usure.....	19
2.3.1    Généralités sur l’usure des matériaux.....	19

2.3.2	Les mécanismes d'usure .....	21
2.3.3	L'usure appliquée au soudage par friction-malaxage .....	23
2.4	Les modèles prédictifs de l'usure des outils .....	25
2.4.1	Les modèles empiriques .....	25
2.4.2	Les modèles informatiques .....	31
Chapitre 3	Matériels et méthodes .....	34
3.1	Introduction .....	34
3.2	Matériaux.....	34
3.3	Propriétés des matériaux.....	37
3.4	La méthode générale.....	41
3.5	La méthode détaillée.....	42
3.5.1	La méthode de soudage .....	43
3.5.2	La méthode de sélection des soudures.....	47
3.5.3	Méthode de production des échantillons à des fins d'analyses .....	50
3.5.4	Méthode de sélection des combinaisons de paramètres pour les soudures d'usure.....	51
3.6	Les soudures d'usure et les mesures d'usure.....	56
3.6.1	Lecture de l'usure par profilométrie .....	56
3.7	Processus d'application d'une équation phénoménologique à l'usure des outils .....	59
Chapitre 4	Présentation des résultats et discussion .....	60
4.1	Introduction .....	60
4.2	Présentation et analyse des résultats .....	60

4.2.1	Les fenêtres opératoires.....	60
4.2.2	Les mesures de températures.....	74
4.2.3	Divers résultats sur les soudures et les matériaux d'assemblage.....	82
4.2.4	Résultats des essais d'usure.....	87
4.3	Présentation du modèle.....	92
4.4	Discussion générale.....	105
Chapitre 5	Conclusion et recommandations.....	108
5.1	Conclusion.....	108
5.2	Recommandations.....	111
	Références.....	112
	ANNEXE A.....	115
	ANNEXE B.....	119
B.1.	AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur.....	119
B.2.	AA6082 T6 / Acier galvanisé DP800.....	121
B.3.	AA6082 T6 / Acier bas carbone A1008.....	122
ANNEXE C	Explications des forces de la machine.....	124

## Liste des figures

Figure 1.1: Schématisation du procédé de soudage par friction-malaxage [1].....	1
Figure 2.1: Schématisation et parties d'un outil de soudage.....	10
Figure 2.2: Nomenclature d'une soudure en recouvrement .....	11
Figure 2.3: Épaisseur effective d'aluminium provoquée par une remontée d'interface importante	12
Figure 2.4: Défauts possibles nuisant à la résistance de l'interface .....	13
Figure 2.5: Soudure contenant un trou de ver .....	15
Figure 2.6: Profondeur de pénétration de l'outil.....	23
Figure 2.7: Taux d'usure des outils utilisés dans [4] en fonction de la vitesse d'avance et de la distance parcourue .....	27
Figure 2.8: Mouvement de matériau schématisé qui provoque une usure dans l'article de Prado [4] .....	28
Figure 2.9: Schématisation du « modèle de chemise de matière rotative » tel qu'exposé par T.J. Prater [33].....	29
Figure 2.10: Représentation de l'action des particules dures dans le modèle expliqué dans l'article de T.J. Prater [33] .....	29
Figure 2.11: Vue en plan du pion de l'outil Trivex©.....	31
Figure 3.1: Mesures en deux dimensions de nano-indentation montrant la microstructure bi-phasée : ferrite en rouge et martensite en jaune .....	37
Figure 3.2: Schéma d'un échantillon de la norme ASTM E8 [41] .....	38
Figure 3.3: Résultats des tests de microdureté sur le WC-Co et la position des tests .....	40
Figure 3.4: Microstructure du WC-25%Co des outils .....	41
Figure 3.5: Soudeuse de type portique de marque MTS et de modèle I-Stir PDS .....	44
Figure 3.6: Soudures sur coupons .....	44

Figure 3.7: Combinaisons de paramètres opératoires testées pour chaque couple de matériaux d'assemblage .....	45
Figure 3.8: Illustration de l'inclinaison de l'outil .....	47
Figure 3.9: Étaux et support envers utilisés pour fixer solidement les tôles à la table amovible ..	47
Figure 3.10: Soudure unique produite en contrôle de force .....	48
Figure 3.11 : Appareil d'essai de traction statique MTS Insight 50W Multihead.....	50
Figure 3.12: Transmetteur sans-fil de la température intra-outil.....	53
Figure 3.13: Récepteur sans-fil pour la lecture de la température intra-outil .....	53
Figure 3.14: Transmetteur et thermocouple installé sur la tête et à l'intérieur de l'outil.....	54
Figure 3.15: Emplacement schématisé du thermocouple .....	55
Figure 3.16: Thermocouple fixé sous la feuille d'acier avant un essai de mesure de température à l'interface .....	55
Figure 3.17: Appareil de microtopographie 3D.....	58
Figure 4.1: Soudure produite en contrôle de position .....	61
Figure 4.2: Exemple d'une enveloppe de fonctionnement d'un bras robotisé en fonction de la distance de sa base et des angles de travail .....	64
Figure 4.3: Fenêtre des paramètres opératoires (AA5083 SPF 1.7mm Ép. /Acier inoxydable 201LN ¼ dur 2.3 mm Ép.) en recouvrement – outil WC-Co .....	65
Figure 4.4: Mosaïque de la microstructure de la soudure AA5083 SPF/SS201LN à 50x, 1,25 m/min, 1500 RPM, 13 kN.....	66
Figure 4.5: Agrandissement à 100x du côté avance de la soudure de la figure 4.4.....	66
Figure 4.6: Mosaïque de la microstructure d'une soudure AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur à 50x, 0,75 m/min, 750 RPM et 15 kN .....	67
Figure 4.7:Fenêtre des paramètres opératoires (AA6082-T6 1.6mm ép. / DP800 galvanisé 2.0mm ép.) en recouvrement – outil en WC-Co.....	69



Figure 4.8: Mosaïque de la microstructure d'une soudure ayant de l'acier galvanisé visualisée à 200x à 0,3 m/min; 750 RPM; 10,2 kN .....	70
Figure 4.9: Fenêtre des paramètres opératoires (AA6082-T6 1.6mm ép. /Acier A1008 2.2mm ép.) en recouvrement – outil en WC-Co .....	71
Figure 4.10: Coupe transversale d'une soudure utilisant l'acier A1008 ayant une vitesse de rotation élevée.....	72
Figure 4.11: Positionnement des thermocouples pour les mesures de températures à l'interface .	75
Figure 4.12: Trou employé pour insérer le thermocouple dans la feuille d'acier .....	76
Figure 4.13: Mesures des distances intra-soudure pour les mesures de températures à l'interface	77
Figure 4.14:Température dans l'outil en fonction de la vitesse de rotation dans un assemblage AA6082-T6/A1008 à 0,3 m/min .....	78
Figure 4.15:Température dans l'outil en fonction de la vitesse de rotation dans un assemblage AA6082-T6/A1008 à 0,5 m/min .....	79
Figure 4.16:Température dans l'outil en fonction de la vitesse de rotation dans un assemblage AA6082-T6/A1008 à 1,0 m/min .....	79
Figure 4.17: Variations de la dureté en fonction de la température pour différents alliages de WC [44] .....	80
Figure 4.18: Variations des propriétés du WC-Co en fonction de pourcentage de cobalt[44] .....	81
Figure 4.19: Analyse en spectroscopie à rayons-X réalisée au MEB d'un échantillon soudéAA5083 SPF/SS201LN .....	82
Figure 4.20: Dureté des différentes phases de l'acier galvanisé DP800 .....	83
Figure 4.21: Schématisation de l'arrachement de grain à partir de la phase souple de l'outil [47]	84
Figure 4.22: Graphique contraintes-déformations de l'acier A1008 en fonction des différentes vitesses de déformation à 500°C et 600°C.....	85
Figure 4.23: Graphique contraintes-déformations de l'acier DP800 en fonction des différentes vitesses de déformation à 500°C et 600°C .....	86

Figure 4.24: Graphique contraintes-déformations de l'acier inoxydable 201LN en fonction des différentes vitesses de déformation à 500°C et 600°C .....	86
Figure 4.25: Coupe transversale d'un outil en fin de vie .....	88
Figure 4.26: Hauteur de l'outil en fonction de la distance parcourue dans le couple de matériaux contenant de l'acier A1008 .....	89
Figure 4.27: Hauteur de l'outil en fonction de la distance parcourue dans le couple de matériaux contenant de l'acier inoxydable 201LN à 750 RPM et 0,75 m/min.....	89
Figure 4.28: Hauteur de l'outil en fonction de la distance parcourue dans le couple de matériaux contenant de l'acier inoxydable 201LN à 1250 RPM et 1,25 m/min.....	90
Figure 4.29: Hauteur de l'outil en fonction de la distance parcourue dans le couple de matériaux contenant de l'acier galvanisé DP800 à 1250 RPM et 1,25 m/min.....	90
Figure 4.30: Mesure de l'aire de contact réelle sur une reproduction microtopographie.....	96
Figure 4.31: Graphique de la hauteur de l'outil en fonction de la distance soudée avec le 201LN et une valeur de kg trouvée avec 750 RPM pour la combinaison de paramètres utilisant 1250 RPM comme vitesse de rotation .....	99
Figure 4.32: Graphique de la hauteur de l'outil en fonction de la distance soudée avec le 201LN et une valeur de kg trouvée avec 1250 RPM pour la combinaison de paramètres utilisant 750 RPM comme vitesse de rotation .....	100
Figure 4.33: Microtopographie de l'extrémité d'un outil neuf .....	102
Figure 4.34: Microtopographie de l'extrémité de l'outil utilisé dans l'assemblage 201LN ¼ dur à 750 RPM à la fin des essais d'usure.....	103
Figure 4.35: Microtopographie de l'extrémité de l'outil utilisé dans l'assemblage 201LN ¼ dur à 1250 RPM à la fin des essais d'usure.....	103
Figure 4.36: Microtopographie de l'extrémité de l'outil utilisé dans les essais d'usure avec le A1008 .....	104

Figure 4.37: Extrémité du pion utilisé dans les essais de soudage pour l'assemblage contenant l'acier DP800 galvanisé après 7 560mm de soudure (l'outil est en fin de vie).....	106
Figure A.1 : Courbe type d'essai de traction statique .....	118
Figure C.1: Graphique de la force latérale en X d'une soudure à recouvrement d'une plaque de AA6082-T6 sur du DP800 galvanisé; 0,3 m/min et 1500 RPM.....	124
Figure C.2: Schématisation de la mesure des forces latérales lors du soudage .....	125

## Liste des tableaux

Tableau 3.1:Composition chimique des alliages d'aluminium utilisés dans les assemblages de la maîtrise (valeurs en % massique) .....	34
Tableau 3.2: Compositions chimiques et microstructures de A) acier inoxydable 201LN ¼ dur B) Acier bas carbone 1008 C) Acier galvanisé DP800 (valeurs en % massique) .....	35
Tableau 3.3: Propriétés mécaniques des matériaux de base utilisés dans les assemblages .....	39
Tableau 3.4: Couples de matériaux utilisés .....	42
Tableau 4.1: Paramètres opératoires de soudage par friction malaxage pour le couple de matériau AA5083 SPF/Acier inoxydable 201LN ¼ dur .....	62
Tableau 4.2:Paramètres opératoires de soudage par friction malaxage pour le couple de matériau AA6082-T6/Acier DP800 Galvanisé .....	62
Tableau 4.3: Paramètres opératoires de soudage par friction malaxage pour le couple de matériau AA6082-T6/AcierA1008.....	63
Tableau 4.4: Résultats des essais de traction simple sur les soudures AA5083 SPF/ Acier inoxydable 201LN ¼ dur.....	68
Tableau 4.5:Résultats des essais de traction simple sur les soudures AA6082-T6/Acier DP800 galvanisé.....	71
Tableau 4.6:Résultats des essais de traction simple sur les soudures AA6082-T6/A1008 .....	73
Tableau 4.7: Taux d'usure en fonction des couples de matériaux .....	91
Tableau 4.8: Valeurs de coefficient empirique d'usure géométrique selon les combinaisons de paramètre opératoires et les matériaux d'assemblages.....	99
Tableau A.1: Résultats des essais de traction simple des assemblages AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur.....	115
Tableau A.2: Résultats des essais de traction simple des assemblages AA6082 T6/ Acier bas carbone A1008 .....	116

Tableau A.3: Résultats des essais de traction simple des assemblages AA6082 T6/ Acier Galvanisé DP800.....	117
Tableau B.1.1: Tableau des valeurs enregistrées pendant les soudures effectuées en contrôle de position en fonction des paramètres opératoires pour les assemblages composés de AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur.....	119
Tableau B.1.2: Commentaires des soudures effectuées en contrôle de position à la suite de l'analyse visuelle pour les assemblages composés de AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur.....	120
Tableau B.2.1: Tableau des valeurs enregistrées pendant les soudures effectuées en contrôle de position en fonction des paramètres opératoires pour les assemblages composés de AA6082 T6 / Acier galvanisé DP800.....	121
Tableau B.2.2: Commentaires des soudures effectuées en contrôle de position à la suite de l'analyse visuelle pour les assemblages composés de AA6082 T6 / Acier galvanisé DP800 .....	121
Tableau B.3.1: Tableau des valeurs enregistrées pendant les soudures effectuées en contrôle de position en fonction des paramètres opératoires pour les assemblages composés de AA6082 T6 / Acier bas carbone A1008 .....	122
Tableau B.3.2: Commentaires des soudures effectuées en contrôle de position à la suite de l'analyse visuelle pour les assemblages composés de AA6082 T6 / Acier bas carbone A1008.....	123

## Liste des équations

(2.1) .....	18
(2.2) .....	26
(2.3) .....	30
(2.4) .....	32
(4.1) .....	84
(4.2) .....	93

## Abréviations

AA: Alliage d'aluminium

Al: Aluminium

DP: "Dual-Phase"

C: Carbone

CNRC: Conseil National de recherches Canada

Co: Cobalt

Cr: Chrome

Cu: Cuivre

Ép.: Épaisseur

Fe: Fer

J: Joule

kN: kilonewton

LN: Low Nitrogen

m: Mètre

MB: Matériau de base

min: Minute

Mg: Magnésium

Mn : Manganèse

Mo: Molybdène

mm: Millimètre

MPa: Mégapascal

N: Newton

N-m: Newton-mètre

O: Oxygène

p/r: par rapport à

RPM: Rotation par minute

Rot.: Rotation

s: Seconde

S: Soufre

SFM: Soudage par friction-malaxage

Si: Silicium

SPF: Superplastic forming

TWI: The Welding Institute

µm: Micromètre

UQAC: Université du Québec à Chicoutimi

W: Tungstène

WC: Carbure de tungstène

WC-Co: Carbure de tungstène allié au cobalt

ZAT: Zone affectée thermiquement

ZATM: Zone affectée thermo-mécaniquement

ZM: Zone malaxée

Zn: Zinc



# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

## 1.1 Généralités

Le soudage par friction-malaxage est un procédé de soudage à l'état solide qui utilise un outil rotatif et une forte pression pour créer une jonction entre deux pièces. Composé d'un épaulement et d'un pion, l'outil vient s'appuyer sur les pièces à assembler et crée ainsi de la chaleur en quantité suffisante pour ramollir les matériaux en même temps de les mélanger par l'action de rotation de l'outil combinée à la force verticale comme représentée à la figure 1.1. Cette chaleur est un élément clé de la technique d'assemblage qui provient de la friction entre l'outil en mouvement et les matériaux ainsi que la déformation plastique dans la soudure.

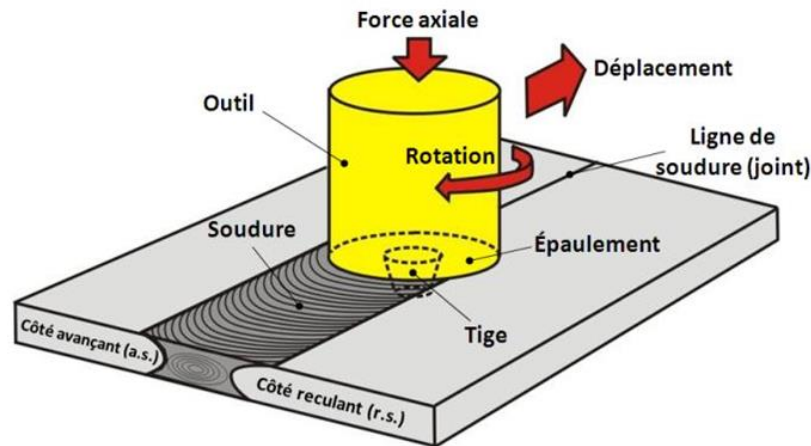


Figure 1.1: Schématisation du procédé de soudage par friction-malaxage [1]

Historiquement, ce procédé d'assemblage a été inventé par Wayne Thomas chez TWI Ltd en 1991 pour le soudage de l'aluminium. Par la suite, les avancées dans le domaine des matériaux ont pu créer des outils capables de supporter les conditions d'opération du soudage par friction-malaxage pour des matériaux à point de fusion élevés comme les aciers à basse teneur en carbone. Plusieurs variantes de ce procédé ont vu le jour au cours des années comme le soudage par point par friction-malaxage qui est une alternative au soudage fusion par point.

Le soudage par friction-malaxage nécessite une machine spécifique de soudage par friction-malaxage contrôlée par un ordinateur où l'utilisateur programme les différents paramètres opératoires dont certains qui peuvent être ajustés en cours de route en temps réel. Ces paramètres opératoires influencent directement la soudure et c'est pourquoi ce procédé est séparé en étape, pour être en mesure de contrôler indépendamment la phase d'amorçage de la soudure elle-même. Le soudage par friction-malaxage peut être séparé en 5 étapes distinctes. Pour une vision plus séquencée du procédé, voici ces 5 étapes:

- La première étape est la fixation des matériaux à assembler et l'approche de l'outil;
- La deuxième étape est la plongée de l'outil;
- La troisième étape est la période d'attente de l'outil ou le temps de maintien. Cette période permet à l'outil de réchauffer le matériel alentour avant de commencer à avancer. Il est important de mentionner que cette étape n'est pas toujours présente;
- La quatrième étape est l'avance de l'outil dans la ligne de soudure;
- La cinquième et dernière étape consiste au retrait de l'outil et au retrait de la fixation des matériaux.

Les paramètres opératoires peuvent changer d'une étape à l'autre et même d'une machine à l'autre puisque le contrôle dépend des capteurs en place. Ceux-ci vont être abordés plus en détail dans ce mémoire.

Dans le contexte de cette recherche, le soudage par friction-malaxage est appliqué sur des matériaux dissimilaires, aluminium et acier. Majoritairement, les matériaux d'assemblage et la géométrie des joints ont été établis par le consortium AlTec du CNRC qui comprend 23 membres dont certains d'entre eux œuvrent dans l'industrie du transport de surface (Automobile et Ferroviaire) par la nature des applications que ces compagnies visent. Les activités d'ALTec se concentrent dans trois pôles technologiques : la fabrication de composants de pointe en aluminium, l'assemblage de composants faits d'aluminium et d'aluminium joint à d'autres matériaux, ainsi que l'évaluation de la durabilité et de la performance. Les matériaux d'assemblages, la géométrie de

joint ainsi que le matériau utilisé pour fabriquer les outils seront abordés en détail dans ce texte. L'application du soudage par friction-malaxage à ce type d'assemblage pose un défi supplémentaire au niveau industriel puisque les outils utilisés usent rapidement dans les matériaux à haut point de fusion comme l'acier. L'implantation d'un système de soudage par friction-malaxage est coûteuse à la base alors il est important de quantifier combien de temps un outil, dispendieux à produire et à acquérir, peut durer dans les applications ciblées pour ainsi évaluer si l'utilisation d'une telle technologie est rentable. D'ailleurs, la rentabilité de cette technologie pour des applications bien spécifiques n'est plus à démontrer puisque *Honda Motors* a intégré le soudage par friction-malaxage de matériaux dissimilaires à la construction du berceau moteur de la version 2013 de la Honda accord [2].

L'intérêt du CNRC, de l'UQAC et des membres AlTec est donc de pouvoir connaître cette donnée manquante à l'aide d'une loi ou d'une équation qui est en mesure de prédire la durée de vie des outils dans les applications ciblées par ces membres. Ce projet en est le sujet.

## **1.2 Problématique**

Le soudage par friction-malaxage de l'aluminium a plusieurs avantages comparativement au soudage par fusion conventionnel. Typiquement, la température atteinte dans le soudage par friction-malaxage ne dépasse pas la température de fusion du matériel ce qui veut dire que le procédé est à l'état solide. Puisque la chaleur introduite dans la soudure est moindre, le retrait après soudage est nettement diminué et le matériau de base est moins dégradé ce qui en résulte par de meilleures propriétés mécaniques de l'assemblage. Un autre avantage associé à cette technologie n'est qu'aucun consommable n'est nécessaire pour réaliser une jonction comme l'apport de métal dans le cas du soudage par fusion. Or, l'outil utilisé est soumis à de grandes contraintes pendant le soudage ce qui en résulte inévitablement par une usure. C'est d'ailleurs le cas lorsque le soudage par friction-malaxage est appliqué à un assemblage dissimilaire contenant de l'acier. Le matériau

de l'outil est bien évidemment choisi en conséquence, mais il demeure qu'une usure va éventuellement dégrader l'outil et ainsi, rendre cet outil inutilisable.

La sélection d'un matériau d'outil idéal pour une application donnée n'est pas toujours un choix simple et évident et il dépend de plusieurs facteurs, dont l'application visée, la facilité de mise en forme, les matériaux d'assemblage en jeux, le coût unitaire de chaque outil qu'on est prêt à mettre ainsi que la disponibilité de ce matériau. Ces deux derniers facteurs influencent beaucoup le choix de ce matériau au niveau industriel. *F. C. Liu et al.* [3] ont référencé quelques matériaux d'outil utilisés depuis des années pour le soudage par friction-malaxage des métaux et il est possible de constater la grande gamme des matériaux disponibles, ce qui indique la difficulté de trouver un matériau idéal et unique.

Il reste néanmoins que peu importe le matériau choisi, l'outil va subir une dégradation quelconque par un mécanisme d'usure ou par une déformation plastique ce qui mènera à une diminution du volume de l'outil ou un changement de géométrie. Avoir un outil de quantification de l'usure des outils en fonction de l'application est nécessaire afin d'évaluer adéquatement quelle serait la durée de vie d'un outil et ainsi évaluer correctement les coûts reliés à l'outillage et éviter de produire de mauvaises soudures dues à des outils trop usés.

### **1.3 Objectifs**

Le principal objectif de ce travail est de déduire une loi ou une équation phénoménologique de l'usure des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage à l'intérieur du cadre industriel prescrit par certains membres du groupe AlTec. Évidemment, cet objectif principal s'accompagne de sous-objectifs essentiels à l'accomplissement de l'objectif principal et permettra d'en tirer des conclusions pouvant être appliquées directement en industrie.

Ces sous-objectifs s'énumèrent ainsi :

- ❖ déterminer une méthode simple et répétable de suivi de l'usure des outils;

- ❖ déterminer des fenêtres opératoires pour les combinaisons de matériaux indiquées par le consortium;
- ❖ être en mesure de mesurer la température de la soudure en temps réel ou tous autres paramètres ayant une influence significative sur la durée de vie de l'outil.

À long terme, ce projet va permettre de cibler les facteurs clés influençant l'usure des outils, de donner une bonne estimation de la durée de vie des outils aux industriels intéressés et éventuellement, pouvoir être implanté dans un code informatique moyennant quelques modifications. Une estimation de l'usure des outils pourra donner une meilleure évaluation des coûts d'implantation d'une telle technologie.

Les sous-objectifs mentionnés précédemment aident à restreindre et à cibler les conditions d'évaluation expérimentales de ce projet de recherche. En ordre de présentation, le premier sous-objectif a comme but précis de déterminer une méthode d'évaluation de l'usure simple d'utilisation pour qu'elle puisse être utilisée au niveau industriel sans nécessiter l'achat d'instrument de métrologie coûteux. Par la suite, le deuxième sous-objectif permet d'expérimenter l'usure des outils dans un contexte réel d'application industriel en sélectionnant des paramètres opératoires pouvant être utilisés pour produire des soudures destinées au domaine manufacturier. En dernier, être en mesure de lire une température de l'outil représentative de ce qui se déroule à l'interface de la soudure permet de donner des valeurs expérimentales pouvant confirmer des hypothèses concernant la dégradation des matériaux.

## **1.4 Méthodologie**

Afin de réaliser cette étude, une méthodologie classique a été employée. Premièrement, une revue de littérature a été effectuée sur plusieurs sujets qui vont tous être abordés dans ce mémoire. Dans un second temps, des sous-objectifs ont été établis et atteints. Il était nécessaire de séquencer la démarche de cette recherche par des sous-objectifs afin d'effectuer les soudures d'usure et avoir assez d'informations sur chacune d'elles. Par la suite, ces informations ont servi à

la troisième et dernière étape de cette recherche, l'écriture d'une loi phénoménologique de l'usure des outils.

La revue bibliographique a été réalisée sur les points suivants :

- ❖ le comportement des matériaux de soudage dans une soudure par friction-malaxage en recouvrement;
- ❖ les mécanismes d'usure applicables aux outils de soudage par friction-malaxage et dans les conditions d'utilisation retrouvées dans cette application;
- ❖ les modèles prédictifs de l'usure applicables au soudage par friction-malaxage.

Afin de se prononcer sur ces points dans le cadre du projet, le comportement des matériaux d'assemblage a été étudié via les différents défauts de soudage retrouvés dans les assemblages produits pour réaliser les fenêtres opératoires des différents couples de matériaux. En analysant la microstructure des mosaïques des soudures, l'effet d'un grand apport de chaleur, d'une rotation trop élevée ou d'une pression trop forte peut être étudié. Entre temps, différentes méthodes d'analyse de l'outil ont été testées pour sélectionner la méthode qui donnait les meilleurs résultats utilisables. Les géométries et les mensurations des outils utilisés pendant les essais ont toutes été mesurées avant le commencement de leur utilisation par la méthode sélectionnée. La constitution des outils a une importance dans l'usure observée puisqu'elle est nécessairement différente entre les outils de compositions et de géométries différentes.

Couplé à un système de prises de températures, un système instrumenté de type portique de soudage par friction-malaxage a été utilisé pour réaliser l'ensemble des essais d'usure afin de quantifier celle-ci en fonction des matériaux d'assemblage utilisés et des paramètres opératoires. Les détails de cette méthodologie vont être présentés dans ce mémoire.

## **1.5 Apport scientifique et industriel du travail**

L'assemblage définitif de matériau dissimilaire prend de l'ampleur à travers le monde afin de créer des structures de toutes sortes possédant la résistance nécessaire tout en étant légères. Un

assemblage aluminium et acier par exemple permet de réaliser cet objectif dans plusieurs domaines dont celui de l'automobile et ferroviaire. Étant dans un marché compétitif, le soudage par friction-malaxage n'est pas toujours le premier choix dans l'industrie. En effet, certaines technologies d'assemblage offrent des alternatives moins coûteuses pour des résultats comparables. Il est vrai que le soudage par friction-malaxage est une technologie relativement récente et plusieurs éléments ne sont pas encore assez contrôlés par rapport à la connaissance de ses compétiteurs. Cette recherche a conduit à l'écriture d'une équation phénoménologique de l'usure des outils permettant de prédire l'usure des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage afin de mieux cerner les coûts associés à cette technologie et de mieux contrôler ce dernier.

## **1.6 Portrait du contenu**

Dans un premier temps, le présent chapitre contient une présentation générale du projet de recherche ainsi d'où vient la problématique rencontrée. Une méthodologie globale a aussi été présentée dans le but de faire ressortir les grandes lignes de ce projet de recherche. Ce mémoire contient quatre autres chapitres qui expliqueront en détail les éléments importants de l'ensemble de cette étude. Dans le chapitre deux, la revue bibliographique détaillée sur les éléments mentionnés à la partie 1.4 de ce présent chapitre est présentée ainsi que leurs liens avec l'usure des outils. Le chapitre trois est consacré à l'analyse des différents matériaux d'assemblage et d'outil, les différentes méthodes de suivi de l'usure et la méthode de sélection des conditions d'essais pour produire de l'usure sur les outils. Par la suite, le chapitre quatre porte sur la présentation des résultats suivis d'une discussion afin d'analyser ces derniers. Pour terminer, le chapitre 5 est une conclusion, une synthèse du projet qui regroupe ce qui a été dégagé au chapitre quatre et relève ce qui peut être poursuivi et bonifié par le biais de travaux futurs.

## **CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE**

### **2.1 Introduction**

Cette section présente l'ensemble des ouvrages pertinents retenus tout au long de cette recherche et explique en quoi ils influencent les conclusions qui sont tirées au chapitre 5. Ce chapitre est consacré aux travaux antérieurs détaillant en quoi les matériaux influencent le résultat des soudures obtenues par friction-malaxage au cours de cette recherche, l'usure des outils ainsi que les modèles qui ont été développés pour prédire l'usure.

### **2.2 Le soudage par friction-malaxage de matériaux dissimilaires**

Une soudure effectuée avec le procédé de soudage par friction-malaxage est générée par un outil et contrôlée par des paramètres opératoires. Dans le but de prédire la durée de vie d'un outil pour une application donnée, il est primordial de connaître les éléments influençant cette dernière. Trois éléments distincts doivent être étudiés ainsi que leurs interactions les uns sur les autres. L'outil de soudage, les matériaux d'assemblage ainsi que les paramètres opératoires sont ces trois éléments. Ils seront traités individuellement dans les paragraphes qui vont suivre puis leur influence mutuelle sera discutée.

#### **2.2.1 L'outil de soudage**

Une soudure par friction-malaxage nécessite un outil de soudage. Actionné par la machine, cet outil subit l'ensemble des charges associées à ce type de procédé : haute température, haute pression, contraintes élevées en torsion, en compression et en flexion. Considérant ces charges, l'outil de soudage doit être résistant et rentable pour qu'une telle application soit considérée.

Plusieurs facteurs influencent la conception d'un outil de soudage. Le premier facteur est les matériaux d'assemblage. Celui-ci détermine principalement le matériau dans lequel l'outil sera conçu. L'avancée des nouveaux matériaux plus résistants aide le domaine en offrant un vaste choix de matériau d'outil pouvant servir à la fabrication de l'outil de soudage. Pour le soudage de



l'aluminium par friction-malaxage, l'acier outil H13 est souvent employé. Cette nuance d'acier a de bonnes propriétés mécaniques tout en étant abordable et est relativement facile à usiner afin de créer des motifs améliorant la qualité des soudures. Toutefois, un matériau ayant une résistance mécanique s'approchant de celle des matériaux d'assemblage réduit considérablement la durée de vie des outils. Les alliages d'aluminium ayant des particules de renfort notamment réduisent la longévité des outils utilisés pour souder ces matériaux [4]. La sélection du matériau d'outil doit considérer plusieurs éléments comme l'affinité avec les matériaux d'assemblage et les vitesses de rotation et d'avance admissibles et donc les forces possibles en jeux. Les matériaux à haut point de fusion comme les nuances d'acier ou les alliages de titane nécessitent donc un matériau d'outil beaucoup plus résistant que l'acier outil (acier H13) conventionnel. Le développement de différentes céramiques techniques pouvant supporter les importantes contraintes retrouvées dans le soudage par friction-malaxage de ces matériaux d'assemblage a démocratisé l'utilisation de cette méthode d'assemblage pour la jonction de ces matériaux. De nos jours, l'utilisation d'outil à base de tungstène (W), de carbure de tungstène (WC) ou de nitrure de bore cubique polycristallin (PCBN) est fréquente et est même un standard dans l'industrie.

Le deuxième facteur est la géométrie du joint qui gouverne les dimensions des différentes parties de l'outil. Dans le cadre de ce travail de maîtrise, uniquement des soudures en recouvrement ont été utilisées. Ce type de joints consiste en l'empilement des tôles à assembler où l'épaisseur des tôles et la profondeur de pénétration nécessaire à une jonction déterminent la longueur du pion.

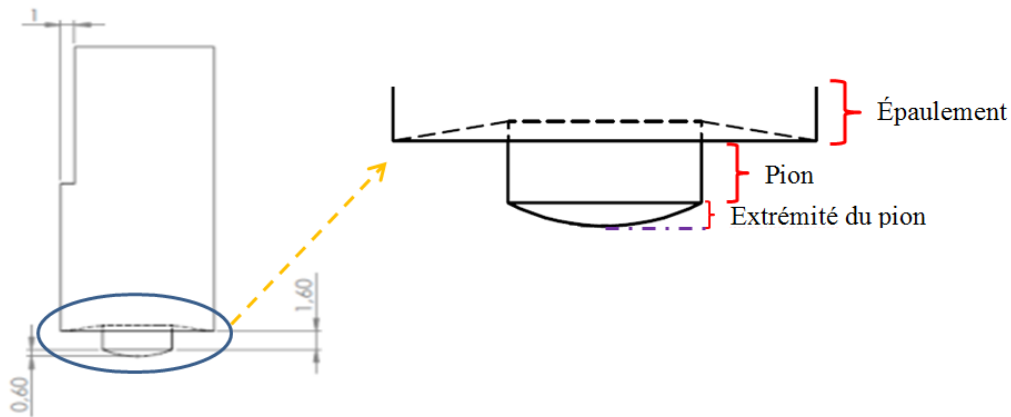


Figure 2.1: Schématisation et parties d'un outil de soudage

La géométrie de l'outil dépend de l'utilisation qui en est faite. La figure 2.1 illustre une géométrie simple d'outil où l'épaulement est légèrement concave et l'extrémité du pion est bombée. Les détails de la géométrie de l'outil influencent grandement le mouvement du matériel dans la soudure [5]. Des rainures sur l'épaulement et sur les flancs du pion peuvent notamment être utilisées pour améliorer le fini de surface et la contention du matériel sous l'épaulement. Des filets orientés inversement à la direction de rotation de l'outil sur le pion peuvent également être utilisés afin d'accentuer le malaxage du matériel du bas vers le haut.

Au cours des années, plusieurs études ont pu développer des méthodes de sélection des géométries d'outil pour une vaste gamme d'assemblage. Les effets des textures et des différentes formes de pion et d'épaulement ne sont pas le sujet de cette maîtrise, mais l'est pour plusieurs articles dans la littérature [6]. Les raisons de sélection des différentes caractéristiques de notre outil seront mises en lumière dans le chapitre suivant.

### 2.2.2 L'assemblage dissimilaire

Considérer les matériaux d'assemblage est important dans le processus de cette recherche puisqu'ils influencent le comportement à l'usure de l'outil. La description exacte des matériaux va être détaillée au chapitre 3, mais la portée de cette recherche étudie l'assemblage de l'aluminium à l'acier.

Le domaine industriel du transport de surface utilise beaucoup l'assemblage en recouvrement puisqu'elle est plus permissive aux irrégularités dimensionnelles des tôles à assembler et aux imprécisions du positionnement du robot qui effectue la soudure. La disposition des matériaux d'assemblage détermine la position de l'usure sur l'outil. Un choix logique de conception d'une géométrie de joint est de positionner le matériau ayant le moins d'impact sur l'outil sur le dessus de l'assemblage et le matériau ayant le plus d'impact sous l'assemblage. Dans le contexte de notre étude, l'assemblage a une configuration tel que l'aluminium est au-dessus de l'acier. Les matériaux ayant un point de fusion élevé ont généralement des propriétés mécaniques plus élevées que les matériaux ayant un point de fusion plus bas comme l'aluminium. En créant un assemblage tel qu'illustré à la figure 2.2, il est possible de circonscrire l'usure critique à l'extrémité de l'outil où les forces en jeux sont plus agressives que sur les flancs de l'outil et l'épaulement.

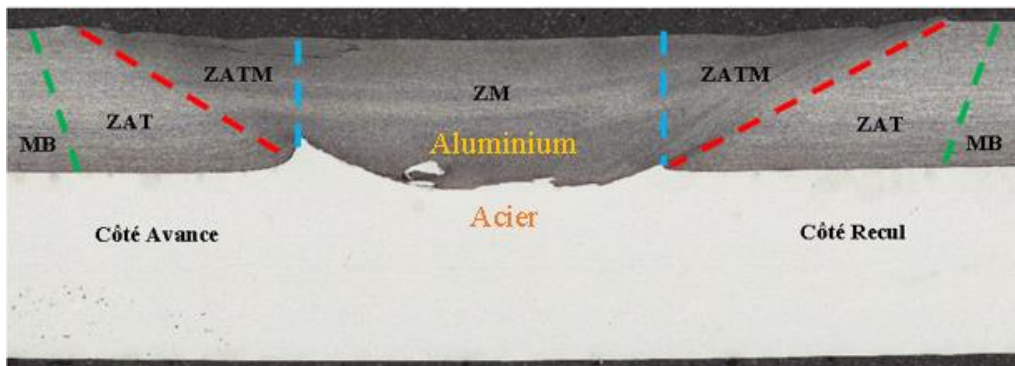


Figure 2.2: Nomenclature d'une soudure en recouvrement

Les assemblages dissimilaires aluminium et acier ont leur complexité puisqu'il faut générer assez de chaleur afin de ramollir l'acier situé en dessous, mais ne pas en produire trop pour diminuer davantage la résistance de la ZAT, la zone affectée thermiquement, qui se situe de part et d'autre de la zone affectée thermomécaniquement (ZATM) et de la zone malaxée (ZM) montrées à la figure 2.2. Le but du soudage par friction-malaxage est de produire un assemblage qui possède de bonnes propriétés mécaniques en réduisant les coûts monétaires et environnementaux. Le point faible d'une soudure par friction-malaxage comportant de l'aluminium est la zone affectée thermiquement (ZAT). L'aluminium traité thermiquement est davantage utilisé dans l'industrie puisqu'il offre des

propriétés supérieures aux alliages non traités. Puisque ces alliages traités thermiquement sont utilisés, la ZAT marque le point faible d'une telle soudure. Dans un assemblage en recouvrement de matériaux dissimilaires, une remontée d'interface se produit du côté avance de la soudure qui correspond généralement aux bords du pion. En effet, il a été montré que la géométrie de l'outil ainsi que les paramètres opératoires ont un effet important sur la remontée d'interface et par conséquent, sur la résistance globale de la soudure dans le cas des assemblages composés uniquement d'aluminium [7]. En ce qui concerne le SFM en recouvrement de matériaux dissimilaires, les oxydes ont aussi une influence, mais c'est d'abord l'influence de la chaleur et donc les paramètres opératoires, qui déterminent la hauteur de cette remontée. Les remontées d'interface peuvent faire partie des défauts volumétriques lorsqu'elles sont très prononcées et influencent négativement la résistance de la soudure. Une remontée d'interface prononcée provoque un amincissement de l'épaisseur d'aluminium effective qui reprend les charges comme il est montré à la figure 2.3.

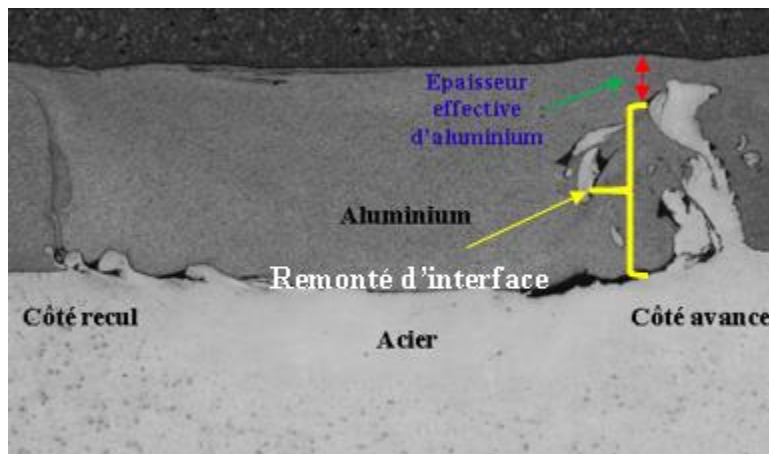


Figure 2.3: Épaisseur effective d'aluminium provoquée par une remontée d'interface importante

Une remontée d'interface moins importante permet d'avoir un ancrage mécanique plus élevé et d'améliorer la résistance à la traction de la soudure. Les matériaux possédant une bonne ductilité sont plus susceptibles de produire une remontée d'interface pour des paramètres opératoires similaires. Dans un assemblage dissimilaire en recouvrement, l'interface constitue bien souvent des défauts internes volumétriques qui doivent être caractérisés en effectuant une métallographie des

coupes transversales des soudures. Ce processus de caractérisation permet de mettre en lumière les différents défauts internes de la soudure et d'écarter les combinaisons de paramètres opératoires qui provoquent des défauts nuisibles à l'intégrité de la soudure.

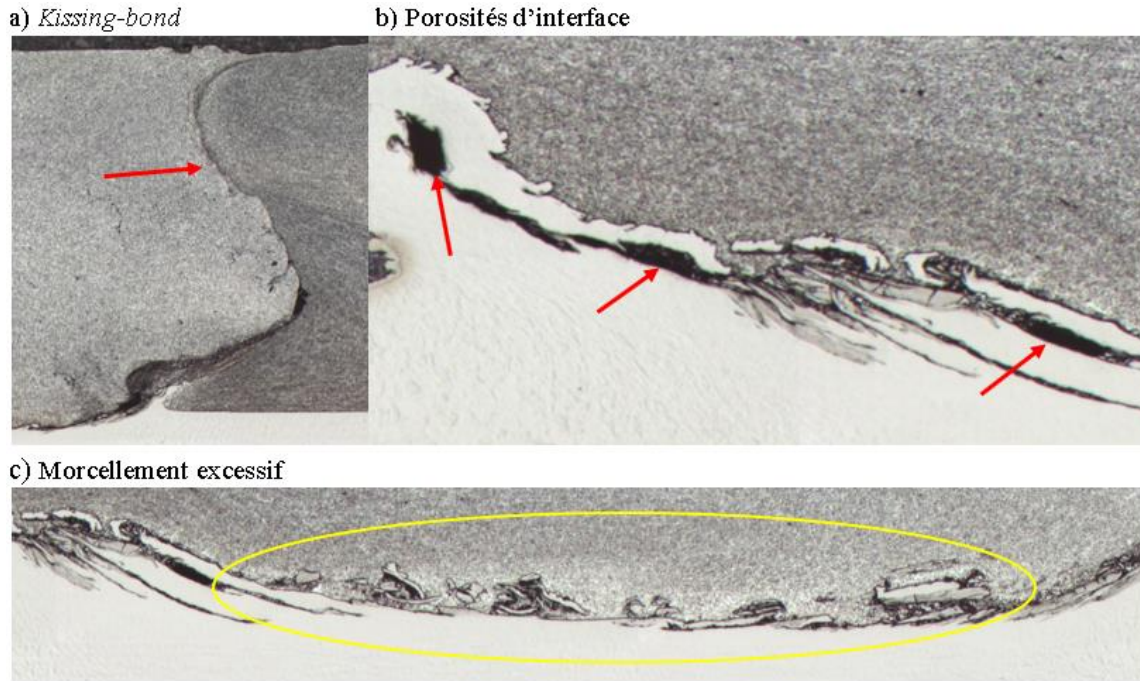


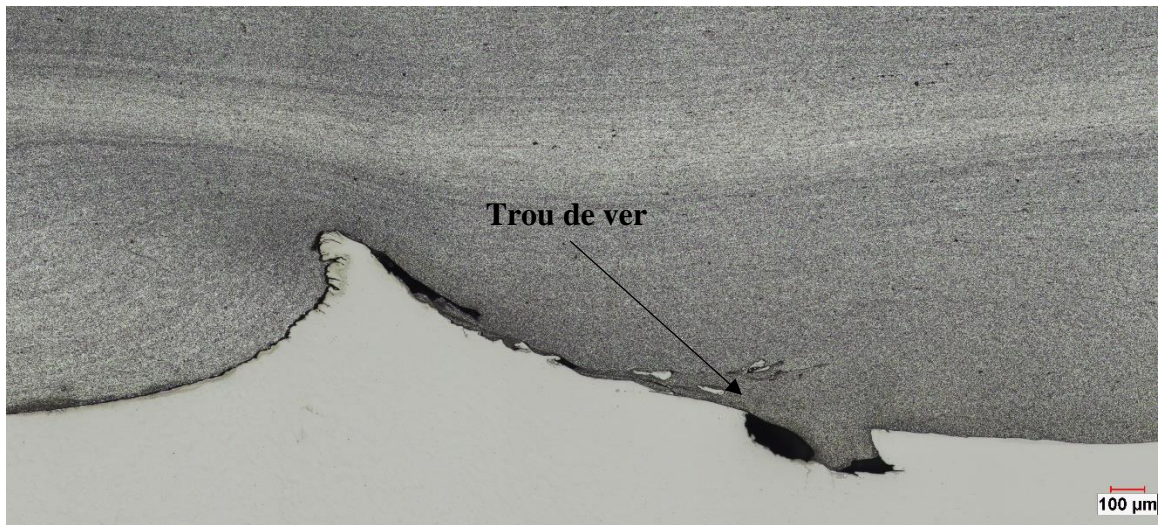
Figure 2.4: Défauts possibles nuisant à la résistance de l'interface

La figure 2.4 montre les différents défauts volumétriques que l'on peut retrouver dans les soudures de l'étude. Ces défauts réduisent la résistance de l'interface et sont provoqués par des combinaisons de paramètres opératoires qui ne sont pas adéquats pour l'épaisseur de tôle et les matériaux utilisés. Cibler une zone de travail où les paramètres produisent des soudures de bonne qualité est une étape importante dans le processus de cette recherche afin d'éviter de quantifier l'usure dans des conditions qui ne seront pas retrouvées en industrie. Plusieurs conditions sont à éviter puisque certaines peuvent créer des défauts (comme on peut le voir à la figure 2.4) ou des composés fragiles, les intermétalliques. La jonction par soudage par friction-malaxage de matériaux dissimilaires tels que certains alliages d'aluminium et certaines nuances d'acier produit des intermétalliques à l'interface ce qui rend la jonction fragile [8]. Ces intermétalliques n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques que les matériaux de base et se retrouvent coincés dans la zone de sollicitation de

l'assemblage. Lorsque cette zone commence à se déformer sous une contrainte, les intermétalliques présents à l'interface ne se déforment pas comme le reste de l'assemblage en raison de leurs différences en propriétés mécaniques. Étant plus fragiles, les intermétalliques contribuent à produire un assemblage fragile. Les conditions d'apparition et de croissance des composés intermétalliques à l'interface sont bien connues et sont à surveiller. L'apparition de ces composés est conditionnelle à une haute température qui peut être atteinte lors de certaines combinaisons de paramètres opératoires. La croissance de ces intermétalliques est accentuée par la vitesse de refroidissement de la soudure [9, 10]. En résumé, la taille de ces composés est liée à l'atteinte d'une certaine température et au temps passé à l'intérieur d'un intervalle spécifique de températures. Il faut donc éviter de créer de telles conditions. Pour revenir à la figure 2.4 qui présente quelques défauts fréquemment retrouvés, voici une brève description de chacun d'eux. Le "Kissing-bond" est une discontinuité du matériel créé par une fine couche d'oxyde de surface qui a remonté pendant la soudure et qui est venu s'intercaler entre la ZATM et la ZAT. Ensuite nous avons les porosités d'interface qui sont simplement de petites cavités à l'interface de la soudure. Il est difficile d'associer ces porosités à un phénomène spécifique, mais elles sont causées, entre autres, par un manque de fluidité du matériau pendant la soudure. Ceci indique notamment que le matériel n'était assez chaud pour combler ces cavités. Le morcellement excessif est causé par un passage trop fréquent de l'outil dans une zone. Ce type de défaut est notamment associé à une vitesse de rotation trop élevée pour la vitesse d'avance de l'outil ce qui provoque des lambeaux de matériaux durs, comme l'acier, à l'intérieur d'un matériau plus mou, comme l'aluminium. Finalement, les trous de ver sont des cavités à l'interface retrouvées sur toute la longueur de la soudure. Ces défauts peuvent facilement commencer et continuer sur toute la longueur de la soudure avec des paramètres opératoires variables. En effet, les trous de ver sont le résultat d'une haute fluidité du matériel autour du pion qui balaie ce matériel en tournant. Obtenir les conditions nécessaires à la création d'une plus haute fluidité créant des trous de ver n'est pas très difficile. Lorsque des combinaisons de paramètres opératoires sont à l'essai, il est fréquent de créer des



conditions assez chaudes résultant de tunnels tout au long de la ligne de soudure illustrée à la figure 2.5.



*Figure 2.5: Soudure contenant un trou de ver*

### **2.2.3 Les matériaux d'assemblage**

Les matériaux d'assemblage sont très importants à considérer pour comprendre leur comportement dans le processus du soudage par friction-malaxage. En effet, chaque matériau a ses particularités par sa composition chimique et ses propriétés mécaniques et thermiques. L'aluminium fait partie des assemblages analysés, mais l'étude de l'usure se concentre principalement à l'extrémité de l'outil où l'aluminium n'a pas ou très peu d'influence sur les mécanismes d'usure en jeu et c'est pourquoi les alliages d'aluminium ne seront pas considérés dans cette partie du mémoire.

Les nuances d'acier utilisées dans cette étude seront détaillées à la méthodologie, dans le chapitre 3. Trois types de nuances d'acier sont abordés, l'acier à basse teneur en carbone, l'acier inoxydable et un acier à double phase. Les différentes nuances d'acier sont composées de phases qui sont de la ferrite, de la perlite, de l'austénite et de la martensite. D'autres types de phases existent dans le vaste monde des aciers, mais mon analyse va se restreindre à ces 4 types de phases. Les nuances d'acier mentionnées précédemment sont toutes composées de ces types de phases comme il sera

détaillé dans le chapitre 3. Ces types de phases ont un arrangement atomique spécifique qui donne certaines propriétés aux aciers. La cinétique de formation de la microstructure est contrôlée par la teneur en carbone et le cycle thermique. Dépendant de la composition chimique et de la méthode de production des aciers, certaines phases apparaissent et procurent les avantages associés retrouvés dans ces aciers. Le procédé de soudage par friction-malaxage engendre deux effets qui affectent les aciers, l'effet de la déformation et l'effet de la chaleur. Ces effets sont utilisés dans la méthode de fabrication des nuances d'acier ce qui implique que ces nuances se retrouvent en présence des mêmes éléments qui ont été utilisés pour leur formation, il est évident que la déformation et la chaleur provoquées par le SFM influencent leurs propriétés mécaniques.

Un acier écroui est plus résistant que sa forme non écrouie. Cette déformation plastique de l'ensemble des grains qui composent l'acier procure une amélioration des propriétés mécaniques et est mieux connu sous le nom de l'effet *Bauschinger* [11]. Cet effet est présent pour tous les aciers, mais à différents degrés. L'effet *Bauschinger* est présent localement dans le procédé de soudage par friction-malaxage puisque l'outil déforme plastiquement la zone adjacente. Cette déformation est créée à une vitesse fonction de la vitesse de rotation de l'outil à condition de poser l'hypothèse que l'outil et la matière alentour n'ont aucun glissement relatif entre eux. Les vitesses de déformation typiquement retrouvées dans le soudage par friction-malaxage sont entre  $1\text{ s}^{-1}$  et  $10^2\text{ s}^{-1}$  dépendamment de la vitesse de rotation de l'outil [12-15]. Dû au durcissement des aciers par l'effet *Bauschinger*, l'effet de la vitesse de déformation sur l'usure des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage de l'acier doit être envisagé.

De plus, certains aciers sont, comme l'aluminium, susceptibles à l'augmentation de la température au-delà d'un certain point. L'effet du durcissement de l'acier et de l'augmentation de la température a probablement une influence sur la durée de vie de l'outil œuvrant dans les conditions de notre étude.



#### **2.2.4 L'influence des paramètres opératoires**

Le soudage par friction-malaxage est un procédé d'assemblage effectué à l'aide d'une machine de soudage. Plusieurs types de machines existent sur le marché et chacun ont leur mode de contrôle qui dépend des capteurs et des boucles de contrôle en place. Celle utilisée dans cette étude est une machine de soudage de type portique qui possède de nombreux dispositifs de contrôle qui peuvent être utilisés, sans s'y limiter :

- La vitesse d'avance;
- La vitesse de rotation;
- La force verticale;
- La force axiale;
- La position verticale de l'outil.

Le processus de contrôle et les consignes utilisés dans le cadre de cette recherche seront abordés en détail dans la section de la méthodologie, le chapitre 3.

La cohésion entre les matériaux et l'apparition de défauts jouent un rôle sur la résistance de la soudure à différents niveaux et peuvent être ajustées avec le contrôle des paramètres opératoires. Un des buts dans le contrôle du soudage par friction-malaxage est d'ajuster la génération de chaleur au travers du joint en fonction des paramètres opératoires. Grossièrement, la combinaison entre la vitesse de rotation de l'outil et la force verticale permet de contrôler la quantité de chaleur générée tandis que la vitesse d'avance de l'outil permet de contrôler la déposition de chaleur.

La vitesse de rotation de l'outil sert à générer de la chaleur et à mélanger les matériaux grâce à la friction entre l'outil et les matériaux d'assemblage. Une augmentation de la vitesse de rotation génère plus de chaleur et permet de ramollir davantage le matériau. Un matériau plus mou générera moins de force sur l'outil lorsqu'il progressera dans le joint, mais doit toutefois être accompagné d'une vitesse d'avance plus élevée afin d'augmenter la distribution de chaleur dans le

joint et ainsi réduire l'impact négatif d'un trop grand apport de chaleur sur les alliages d'aluminium. Il y a toutefois une limite à l'augmentation de la vitesse de rotation puisque la friction à l'interface peut changer de mode entre glissement et adhérence [16, 17]. Le mode de friction en glissement réduit la déformation plastique du matériau et réduit par le fait même la production de chaleur.

La vitesse d'avance permet une distribution de la chaleur produite avec la rotation de l'outil le long du joint. Une vitesse d'avance basse permet d'avoir moins de force qui pousse contre la direction d'avance de l'outil en permettant à la chaleur de pénétrer davantage dans les matériaux par conduction et ainsi, réduire la résistance à la déformation plastique que l'outil produit. Une vitesse d'avance élevée augmente la vitesse à laquelle la soudure est produite et permet une pénétration de la chaleur moins importante comparativement à une vitesse d'avance basse qui permet une meilleure pénétration de la chaleur pour une même vitesse de rotation de l'outil. Toutefois, les forces engendrées sur l'outil sont plus importantes avec une vitesse d'avance élevée. Dans le soudage par friction-malaxage, la chaleur introduite dans la soudure par unité de longueur se nomme l'énergie spécifique. Un lien empirique bien connu dans le monde industriel et utilisé mainte fois au cours de cette recherche est le lien établi dans l'article de *S. Cui* [18]:

$$E_s \approx M \frac{\omega}{v} \quad (2.1)$$

où l'énergie spécifique ( $E_s$ ) est considérée proportionnelle au couple ( $M$ ) multiplié par le ratio de la vitesse de rotation de l'outil ( $\omega$ ) sur la vitesse d'avance ( $v$ ). Cette nomenclature sera conservée tout au long de ce mémoire. L'énergie spécifique est utile pour quantifier l'apport de chaleur pour une combinaison de paramètres opératoires donnée. Dans le cadre de la maîtrise,  $\omega$  et  $v$  sont fixés pour un essai et le couple est lu grâce à un capteur sur la machine de soudage. Une énergie spécifique peut donc être calculée par la suite et donner une valeur en Joules/mm de soudure. Cette quantification sert à déterminer l'impact d'une combinaison de paramètres opératoires sur la zone affectée thermiquement (ZAT) observée à la figure 2.2 ou sur la création d'intermétalliques à l'interface de l'aluminium et l'acier comme discuté dans la section précédente.

Les paramètres opératoires sont les intrants du procédé de soudage par friction-malaxage et un des paramètres sortants importants dans notre étude est la vitesse de déformation puisqu'elle influence le comportement de certains aciers comme mentionné à la section précédente. Celle-ci dépend de la combinaison de la vitesse d'avance et de la vitesse de rotation, de la force verticale exercée, du diamètre de l'épaulement, du diamètre du pion, de la géométrie de l'outil et de la température atteinte [12]. Difficilement mesurable expérimentalement, la vitesse de déformation est un paramètre qui est davantage évalué en simulation numérique. Les différents ouvrages consultés suggèrent d'utiliser une vitesse de déformation que se situe entre  $1 \text{ s}^{-1}$  et  $10^2 \text{ s}^{-1}$  [12-15]. Considérant le comportement durcissant de certains matériaux d'assemblage à une vitesse de déformation se situant dans l'intervalle théorique que le soudage par friction-malaxage produit, il est évident que l'usure des outils est influencée par ce paramètre.

## **2.3 L'usure**

L'usure des matériaux fait partie d'une science qui étudie l'usure des surfaces qui se nomme la tribologie. Cette science est vaste et demeure un sujet d'étude en soi. La tribologie demande des analyses à l'échelle microscopique des surfaces ce qui rend l'étude de cette science dans le contexte de cette recherche trop fastidieuse pour qu'elle soit considérée même dans sa théorie de base. C'est pourquoi seuls les mécanismes d'usure seront abordés d'après l'application à l'aide d'informations trouvées dans la littérature.

### **2.3.1 Généralités sur l'usure des matériaux**

Du point de vue des matériaux, l'usure peut être considérée comme une perte de matière ou encore une déformation permanente. Principalement, une définition simple de l'usure peut se traduire par une modification de l'état de surface ou du volume d'une pièce de matériau. Suivant cette dernière, toute modification de l'état général d'un outil de soudage par friction-malaxage est considérée comme de l'usure.

L'usure des matériaux est très complexe en soi puisqu'elle regroupe plusieurs domaines de la physique. Le comportement mécanique des matériaux sous une sollicitation est différent selon la nature du matériau, généralement fragile ou ductile. De plus, les conditions d'usure peuvent être lubrifiées ou non lubrifiées ce qui influence grandement le taux d'usure. Étant donné que l'usure peut être une perte de matière, une détérioration du matériau ou encore une déformation permanente, le taux d'usure peut difficilement regrouper l'ensemble de ces types d'usures. C'est pourquoi le taux d'usure est, dans le cadre de ce projet de recherche, associé à la quantité de matériau perdu par unité de distance et quantifie comment une application précise affecte le matériau à l'étude. La surface de contact est d'un intérêt particulier dans le domaine de la tribologie et est le sujet de plusieurs articles à travers les années qui se sont penchés sur l'influence et les modèles des solides en contact. Les premiers auteurs à se pencher plus profondément sur l'ensemble de ces aspects de l'usure sont *Frank Philip Bowden* et *David Tabor*, tous deux physiciens de formation qui ont ciblé quelques paramètres influençant grandement l'usure. Ils ont pu déterminer que l'aire de contact réel, c'est-à-dire la proportion d'une surface qui est réellement en contact avec un autre, était beaucoup plus petite que l'aire de contact apparente et que celle-ci serait affectée principalement par la pression exercée verticalement sur le contact ce qui cause une déformation plastique du matériau [19]. Par la suite, ils ont établi que l'usure ne pouvait pas être considérée comme un phénomène de surface, mais bien comme un phénomène où de la distorsion et de la pénétration se produisaient à une certaine profondeur sous la surface et que les forces de friction et la nature du glissement étaient tous deux influencées par les propriétés générales du matériau comme sa dureté relative ainsi que la température de fusion [20]. Quelques années plus tard, la loi générale d'usure d'*Archard*, qui sera présentée plus loin dans cette section, voyait le jour en se basant sur les conclusions de ses prédécesseurs [21].

### 2.3.2 Les mécanismes d'usure

L'usure se décrit par des mécanismes distincts qui permettent de qualifier le mode d'enlèvement de matière et de modification de la géométrie initiale par des déformations permanentes. En associant ces mécanismes d'usure à un mode de sollicitation et donc à un mécanisme en particulier, il est plus simple de comprendre l'interaction des composantes du système tribologique à l'étude.

Les ouvrages en tribologie ne s'accordent pas tous pour un consensus dans la classification des mécanismes d'usure [22]. Celle qui a été retenue dans le cadre de cette recherche classe ces mécanismes par les débris d'usure ou la forme de la trace que l'élément qui provoque l'usure laisse sur la surface. Plusieurs mécanismes d'usure peuvent être cités, mais l'intérêt sera dirigé principalement sur cinq d'entre eux qui peuvent se produire dans un cas où deux métaux sont en contact et glissent l'un sur l'autre: l'usure adhésive; l'usure abrasive; l'usure corrosive; l'usure par fatigue de surface et l'usure érosive. La déformation plastique est intrinsèque dans plusieurs mécanismes d'usure puisque le comportement mécanique du matériau intervient dans la création de débris par exemple. Il faut toutefois préciser que la déformation plastique comme mécanisme d'usure à part entière est reliée à un changement de géométrie de l'outil en ne considérant aucune perte de matière. Cependant, ce mécanisme d'usure est écarté de notre étude puisque les outils montrent de très faibles signes de déformations permanentes comparativement aux autres mécanismes d'usure, mais n'a pas été mesuré.

Ces mécanismes d'endommagement des surfaces ont des importances relatives en fonction de la pression exercée, la vitesse de glissement, la géométrie de contact, etc. Ceux-ci sont classés dépendants des traces qu'ils laissent sur les surfaces ainsi que du mode de sollicitation. Les détails des mécanismes d'usure ne sont pas expliqués puisque ce n'est pas le sujet de ce travail, mais il faut savoir que les définitions des mécanismes d'usure ne sont pas complètes. Chaque mécanisme concerne deux surfaces en contact, la surface usée et sa surface antagoniste. Pour des contacts entre

métaux, l'usure adhésive est caractérisée par une surface usée qui laisse partir son volume par des particules qui se détachent de cette surface au profit de l'autre en créant une microsoudure à la jonction entre les deux. Suivant les observations des chercheurs en tribologie mentionnés précédemment, plus la pression sur cette surface est grande, plus l'aire de contact réelle augmente et plus l'usure par adhésion est sujette à se produire. L'usure abrasive est caractérisée par une particule relativement dure qui produit une rainure sur la surface usée ce qui enlève une certaine quantité de matière. Il arrive que l'usure abrasive soit sous catégorisée en usure à deux corps et usure à trois corps [23]. L'usure à deux corps se produit entre un corps abrasif et un corps antagoniste subissant l'usure. En ce qui concerne l'usure à trois corps, elle se produit généralement après une certaine longueur parcourue sur la surface usée et se caractérise par un système tribologique qui produit une particule dure coincée entre deux corps qui possèdent une vitesse relative. La surface ayant un matériau plus mou s'en retrouve donc affectée par le système tribologique mentionné précédemment [24]. L'usure corrosive quant à elle est caractérisée par un environnement propice à l'apparition de la corrosion en surface par l'affinité galvanique que certains matériaux ont entre eux. Cette corrosion diminue bien souvent la cohésion inter granulaire des grains des matériaux et est donc sujette à l'arrachement de grains affectés dû aux mouvements relatifs des pièces [25]. L'usure par fatigue de surface se produit lorsqu'un mouvement répété s'effectue sur une surface et que celle-ci subit un bris en fatigue localisé sur la surface. En ce qui concerne l'usure érosive, elle est caractérisée par un enlèvement de matière par l'action des impacts entre la surface et les particules dures contenues dans un mélange semi-liquide. Les trois derniers mécanismes d'usure ont été moins bien définis puisque ceux-ci ne se retrouvent pas dans les mécanismes d'usure appliquée au soudage par friction-malaxage comme cela sera discuté dans la section suivante.

### 2.3.3 L'usure appliquée au soudage par friction-malaxage

Cette section est consacrée à l'établissement des mécanismes d'usure possible que l'on peut retrouver pour les conditions de cette recherche. Il n'a pas été possible de caractériser l'état de surface des outils de soudage ce qui implique que les mécanismes d'usure qui ont été ciblés sont basés sur les résultats de différents travaux retrouvés dans la littérature. Étant donné qu'ils n'ont pas été confirmés par des observations, ceux-ci sont considérés comme étant des hypothèses de travail.

Afin de bien cerner les ouvrages applicables à ce projet, il est essentiel de cibler précisément les conditions dans lesquelles l'outil travaille et de baser la recherche de travaux de référence autour de ces conditions. Ce projet de recherche considère un outil de soudage par friction-malaxage fonctionnant dans un assemblage en recouvrement composé d'aluminium et d'acier où la feuille d'acier se situe en dessous et la feuille d'aluminium sur le dessus comme on peut le voir à la figure 2.6.

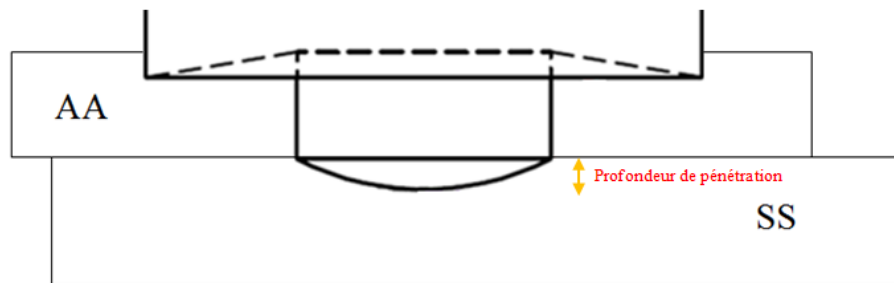


Figure 2.6: Profondeur de pénétration de l'outil

Bien qu'il soit préférable d'étudier l'usure sur l'ensemble de l'outil, seule l'usure à l'extrémité du pion est étudiée. La raison est que la feuille d'acier produit beaucoup plus d'usures que l'aluminium et donc affecte beaucoup plus rapidement l'extrémité des outils pour cette configuration d'assemblage.

Avec les années de développement dans le domaine du soudage par friction-malaxage, il est maintenant possible d'effectuer une soudure dans les matériaux comme l'acier. Bien qu'au

début non viable pour une application à grande échelle, les avancés dans le domaine des matériaux ont pu produire des outils qui peuvent supporter les contraintes intenses générées dans ce type d'application. Étant un domaine où la recherche investigue beaucoup, plusieurs auteurs se sont penchés sur le SFM des matériaux à haut point de fusion comme les aciers. Plus particulièrement, l'usure des outils a été étudiée et quelques conclusions en sont émergées. La revue de littérature effectuée dans ce domaine concernait l'usure des outils utilisés dans les conditions de soudage énumérées plus haut. Toutefois, étant donné le manque d'informations disponible dans la littérature, cette revue a davantage été dirigée vers l'usure des outils utilisés dans le soudage des nuances d'acier où l'information est plus abondante. Cependant, il faut éliminer les effets de la très haute température retrouvée dans ce type d'application. D'ailleurs, certains auteurs ont relevé que la déformation, c'est-à-dire le changement des dimensions de l'outil sans perte de masse, des outils était la cause principale d'usure causée par la haute température de soudage et la phase de plongée de l'outil [13]. L'action du soudage par friction-malaxage sur l'acier est bien évidemment différente de celle sur l'aluminium puisque la conductivité thermique est plus faible, le point de fusion beaucoup plus élevé et la microstructure est très différente. Pour certaines nuances d'acier, la rotation de l'outil provoque un écrouissage local ce qui augmente sa dureté en fonction de la vitesse de déformation comme mentionnée précédemment. Lors de la lecture de certains ouvrages reliés au sujet de ce mémoire, des éléments en particulier ont été analysés et ciblés par les auteurs qui affectent l'usure lors de leurs analyses. Les mécanismes de dégradation des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage des nuances d'acier sont [26, 27]:

- la déformation plastique provoquée par l'utilisation des outils au-delà de la limite élastique admissible du matériau utilisée;
- l'usure abrasive par l'action des particules dures contenues dans le matériau d'assemblage;
- l'usure adhésive.



Ces auteurs [26, 27] suggèrent aussi que la microstructure du matériau d'outil a un impact majeur sur la résistance à l'usure et qu'un outil extrudé possède de meilleures propriétés mécaniques dues à une uniformité dans la microstructure et à une taille de grains plus petites. Le WC-Co par exemple possède une meilleure résistance à l'usure lorsque les carbures sont petits et uniformes, mais cette résistance diminue en fonction de sa teneur en cobalt [28].

## **2.4 Les modèles prédictifs de l'usure des outils**

Dans le domaine industriel, la durée de vie des outils influence la qualité des produits fabriqués en réduisant l'efficacité des arrêtes tranchantes par exemple. Pouvoir prédire le nombre de pièces pouvant être produites sans affecter leur qualité est un avantage certain lorsque la qualité des pièces est importante et lorsque le coût des outils l'est aussi. Les modèles prédictifs de l'usure des outils peuvent aider à construire un standard de longévité pour les outils utilisés et ainsi mieux prévoir les changements d'outils afin de garantir une qualité constante.

Des similitudes peuvent être faites entre le soudage par friction-malaxage et l'usinage à sec. En effet, les deux procédés utilisent sensiblement les mêmes matériaux d'outillage et ils n'utilisent pas de lubrifiant. Les conditions d'usure sont donc similaires dans les deux procédés. Toutefois, la géométrie de l'outillage cause des mécanismes d'usure bien étudiés dans la littérature [29] et différents par rapport au soudage par friction-malaxage. La présente section est une revue de différents modèles qui peuvent prédire la durée de vie d'un outil de soudage spécialisé.

### **2.4.1 Les modèles empiriques**

Les modèles empiriques se basent sur une formule simple corrélée avec des données expérimentales pour arriver aux résultats désirés. Ces modèles sont très utiles puisqu'ils prennent en compte les éléments qui influencent le phénomène étudié et associent ceux-ci aux résultats expérimentaux obtenus par des essais contrôlés. Ce type de corrélation permet d'obtenir des équations simples couplées à une charte ou différents facteurs dépendent du contexte du problème à résoudre. Sans ces modèles empiriques, plusieurs situations en ingénierie demanderaient une

analyse physique trop complexe ou ne seraient tout simplement pas résolues à ce jour. La charte de Moody utilisée dans les problèmes d'écoulement de fluide en transfert de chaleur en est un bon exemple [30]. Dans cette charte, une série d'essais expérimentaux ont donné assez d'informations pour construire une base de données. Une équation empirique possédant les facteurs influençant le phénomène est ensuite utilisée avec cette charte pour résoudre les problèmes reliés à ce type d'application. Cet exemple démontre que des modèles empiriques sont une pratique courante dans le domaine de l'ingénierie pour représenter un phénomène complexe à l'aide d'une équation simple, mais phénoménologique, c'est-à-dire relier directement aux éléments qui influencent le phénomène à l'étude.

Un pionnier qui a certainement laissé sa trace dans le monde de la tribologie est l'ingénieur *John Frederick Archard* qui a étudié les contacts entre les surfaces ce qui l'a mené à étudier l'usure. Appuyée par ses prédécesseurs en tribologie, la loi d'usure d'*Archard* a été instaurée comme étant [31]:

$$W = \frac{KP}{p_m} \quad (2.2)$$

où  $W$  est le taux d'usure,  $K$  est le coefficient de friction,  $P$  est la force normale et  $p_m$  est la pression d'écoulement. En d'autres mots, l'équation 2.2 relie la force normale et la dureté du matériau le plus mou afin d'obtenir un taux d'usure calculé en volume perdu par une distance parcourue [32]. Le coefficient de friction  $K$  dans l'équation 2.2 doit être trouvé expérimentalement et corrélé par la suite avec les résultats observés. La loi d'usure d'*Archard* est encore utilisée pour des problèmes d'usure simple et est intéressante à considérer lorsque les conditions de contact ont comme hypothèse qu'elles sont constantes. Afin de simplifier les modèles informatiques du soudage par friction-malaxage, les conditions de contacts entre l'outil et les matériaux d'assemblage demeurent constantes. En résumé, la loi d'usure d'*Archard* est un modèle simple des problèmes de glissement à sec entre les métaux. En gardant ce modèle en tête, il faut par la suite se concentrer sur un modèle d'usure appliqué spécifiquement au soudage par friction-malaxage. Les articles sur ce sujet ne sont

pas nombreux dans la littérature et se concentrent beaucoup sur la minimisation de l'usure pour une application spécifique, et peu d'entre eux parlent des conditions rencontrées dans les recherches réalisées. Les travaux réalisés pour l'assemblage des matériaux à matrice composite donnent davantage d'informations concernant l'usure puisque les outils utilisés, dans ce cas peu importe le matériau d'outil, subissent énormément de dommage. Un ouvrage qui revient souvent ou qui se fait souvent citer est l'article *R. A. Prado* qui attribue le qualificatif d'auto-optimisé à un outil qui a subi beaucoup de perte de matière dans une configuration d'assemblage bout à bout [4].

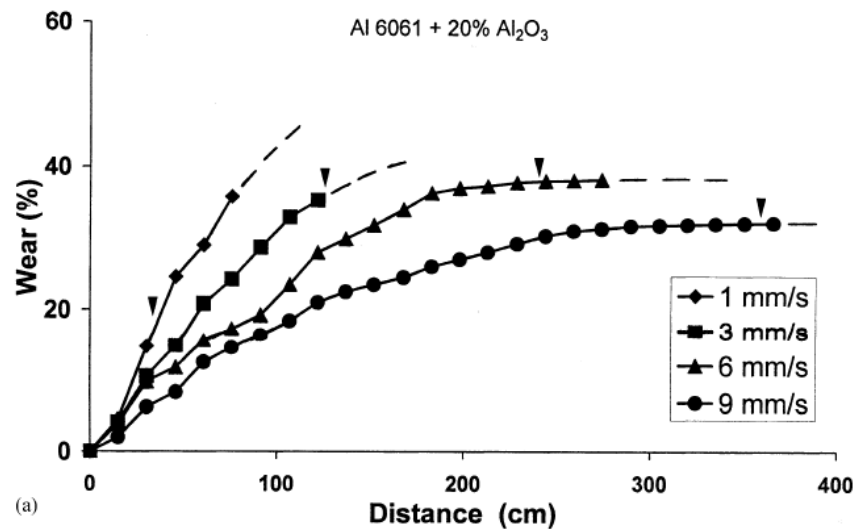


Figure 2.7: Taux d'usure des outils utilisés dans [4] en fonction de la vitesse d'avance et de la distance parcourue

La figure 2.7 expose la tendance, qui a été dégagée par l'étude en référence, des outils utilisés dans l'assemblage d'alliages d'aluminium additionnés de particules d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Une analyse phénoménologique révèle que le mouvement de matériau à l'intérieur de l'assemblage pendant la soudure provoque l'apparition d'un plateau d'usure. Ce qui veut dire que l'outil continue de produire de la soudure sans montrer davantage d'usures.

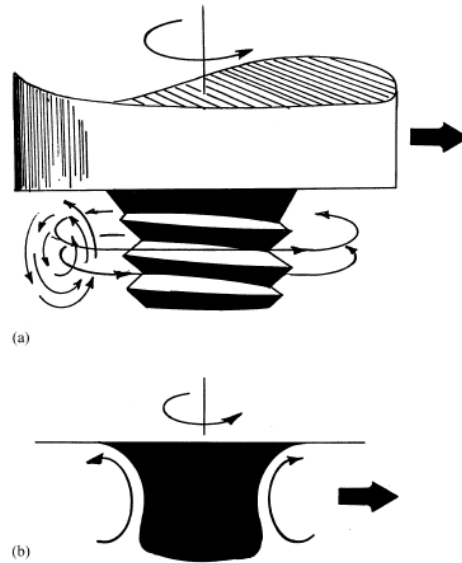


Figure 2.8: Mouvement de matériau schématisé qui provoque une usure dans l'article de Prado [4]

La figure 2.8 présente le principe avancé dans l'article de *Prado*. Le mouvement de matière gruge l'outil de soudage jusqu'à ce que l'outil usé ne produise plus le même patron de mouvement de matière et ne soit plus affecté par ce dernier. Il faut se rappeler que le matériau d'assemblage étudié dans l'article cité ci-dessus contient des particules possédant une dureté plus élevée que celle de l'outil ce qui ne joue certainement pas en faveur de la durée de vie de l'outil.

Le déplacement de matière joue un rôle important dans l'usure des outils comme le démontre l'article de *Prado* et ce principe peut être la base d'un modèle prédictif. D'ailleurs, un des seuls modèles phénoménologiques qui traite de la prédiction de l'usure des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage se base sur l'interaction des particules dures contenues dans un matériau d'assemblage à matrice composite sur l'outil. *The rotating plug model*, schématisé à la figure 2.9, est emprunté dans la prédiction de l'usure des outils utilisés dans l'article de *Tracie J. Prater*. Cet article est un bon exemple de modèle phénoménologique de prédiction de l'usure [33].

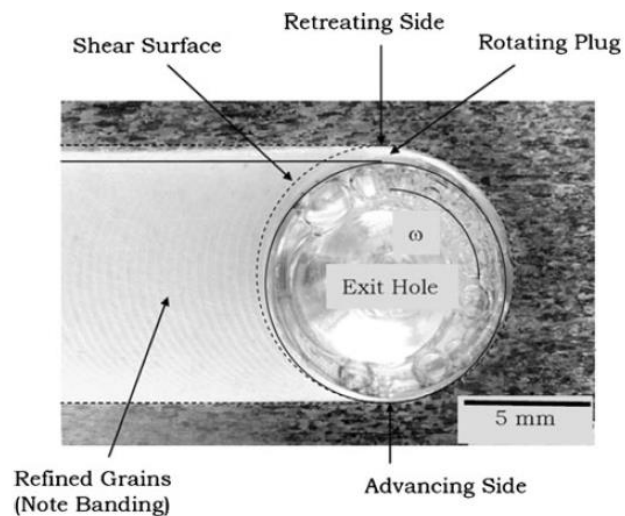


Figure 2.9: Schématisation du « modèle de chemise de matière rotative » tel qu'exposé par T.J. Prater [33]

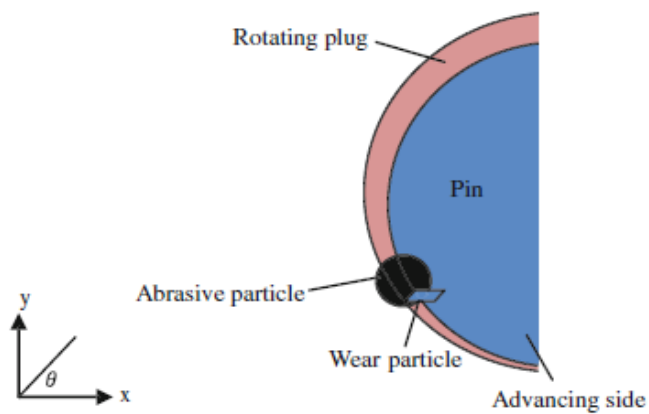
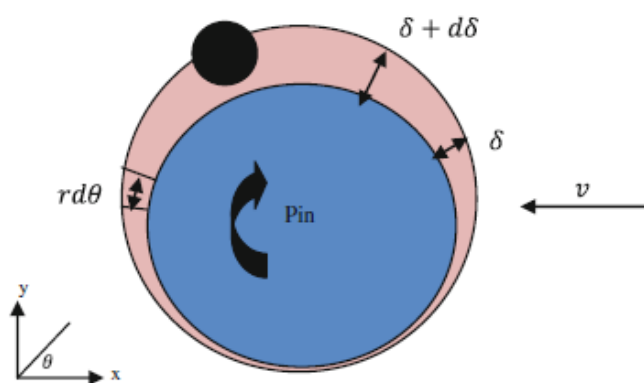


Figure 2.10: Représentation de l'action des particules dures dans le modèle expliqué dans l'article de T.J. Prater [33]

Ce modèle consiste en un outil qui crée un cylindre de matériel en mouvement dans son voisinage immédiat. Ce cylindre de matière plastique est décentré par rapport à l'outil comme on peut le voir à la figure 2.10. En progressant dans un matériau d'assemblage contenant des particules abrasives, le système combiné de l'outil et du cylindre de matière rencontre ces particules. En fonction de la position de celles-ci et de leur taille, l'usure sur l'outil est plus ou moins importante puisque le cylindre de matière protège ce dernier de l'action de ces particules abrasives sur l'outil. Le tout mis en équation, il en résulte du "Rotating Plug model". La figure 2.10 aide à bien comprendre comment les particules influencent l'outil dans le modèle. En se basant sur des paramètres opératoires ciblés et sur un modèle d'occurrence des particules dures sur l'outil, l'usure peut être prédite en comparant le volume de l'outil avant la soudure et le volume de l'outil après la soudure. Dans l'article mentionné précédemment, les auteurs adaptent une formule qui existe déjà avec les paramètres opératoires désirés et effectue une corrélation entre les valeurs d'usure prédites par la formule et les valeurs obtenues expérimentalement.

$$\% \text{ usure} = \frac{5D\Delta C_{max}P\omega l}{24Rv} \quad (2.3)$$

L'équation 2.3 correspond à la formule pour la prédiction du pourcentage d'usure dans le travail de *T.J. Prater* [33]. Provenant de manipulations mathématiques et de changement de paramètres, l'équation peut prédire l'usure des outils pour une soudure réalisée dans un alliage d'aluminium contenant des particules céramiques en configuration bout à bout. Elle ne peut être appliquée comme telle dans un autre contexte. Les paramètres utilisés dans l'équation 2.3 peuvent être expliqués avec l'appui de la figure 2.10.  $D$  représente le diamètre moyen des particules abrasives,  $\Delta C_{max}$  se nomme l'arc maximum de coupe et est défini par la position circonférentielle maximale sur l'outil où les particules exercent une action de coupe,  $P$  est la proportion en volume de particules abrasives,  $\omega$  est la vitesse de rotation de l'outil,  $l$  est la distance soudée,  $R$  est le rayon de l'extrémité de l'outil et  $v$  est la vitesse d'avance. Sans présenter les résultats en entier, les auteurs arrivent à la conclusion que plusieurs facteurs sont à l'origine des différences parfois importantes entre le

pourcentage de volume de matière mesuré retiré par l'usure réelle et le volume de matière prédit retiré par l'usure:

- L'outil utilisé pour les soudures expérimentales était un *Trivex*®, une géométrie d'outil spécifique montré à la figure 2.11. La formulation développée est pour un outil cylindrique possédant une extrémité plate;
- La formule ne prend pas en compte l'évolution de la géométrie de l'outil par l'usure. Plus l'outil effectue des soudures, plus la géométrie varie;
- L'impact de la température influence la largeur du chemisage de matière, le cylindre de matière plastique créé par l'action de rotation de l'outil et la chaleur. Cette largeur est représentée à la figure 2.10. En modifiant cette largeur, les possibilités que des particules dures affectent la surface de l'outil changent aussi ce qui se répercute sur l'usure.

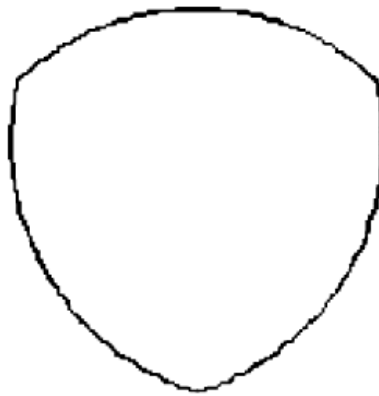


Figure 2.11: Vue en plan du pion de l'outil *Trivex*®

#### 2.4.2 Les modèles informatiques

Étant donné le nombre important d'éléments à considérer pour prédire l'usure des outils de façon mathématique et physique, les modèles numériques ou informatiques sont intéressants puisqu'ils peuvent faire un grand nombre de calculs rapidement. En implantant une routine de calcul sur les équations constitutives des phénomènes en jeu, il est possible de calculer la perte de matière des outils et donc, leur durée de vie. Avec les années en recherche, les interactions entre les matériaux d'assemblage et les outils ont été étudiées et sont de mieux en mieux comprises.

Bien souvent, la prédiction de l'usure des outils fait partie des résultats qui peuvent être affichés lorsqu'un code informatique de simulation numérique du soudage par friction-malaxage est créé en utilisant les équations de contacts entre les matériaux ainsi que leur comportement pour de grandes vitesses de déformation. Bien que ces codes numériques ne soient pas très nombreux, il en existe tout même quelques-uns qui appliquent différentes méthodes afin de résoudre les équations constitutives de ce type de problème. La loi d'usure d'Archard est alors employée et modifiée selon les conditions rencontrées comme dans l'ouvrage de *Kirk Fraser* où cette loi est utilisée dans le cadre d'un modèle numérique de simulation du soudage par friction-malaxage [17]. L'auteur dédie une bonne partie des résultats obtenus des simulations au traitement des données utilisables pour calculer l'usure. La méthode de calcul ne sera pas expliquée ici, mais l'équation utilisée pour calculer le taux d'usure est présentée à l'équation 2.4 :

$$\dot{d}_{wear} = \frac{k_{wear}}{H_v(T)A_c} \|\bar{F}_N\| \|\bar{v}_T\| \quad (2.4)$$

Cette équation donne le taux d'usure de l'outil ( $\dot{d}_{wear}$ ) en fonction d'une constante d'usure  $k_{wear}$  qui est spécifique à la combinaison du matériau de l'outil, du matériau d'assemblage, la dureté de l'outil en fonction de la température ( $H_v(T)$ ) ainsi que l'aire de contact ( $A_c$ ). Le module de la force normale ( $\|\bar{F}_N\|$ ) et le module de la vitesse tangentielle ( $\|\bar{v}_T\|$ ) sont également employés dans l'équation 2.4 pour déterminer un volume de perte de matériau par unité de longueur. L'auteur stipule que la méthode et les équations employées donnent de bons résultats, mais que ceux-ci doivent être confirmés par un plan complet d'essais expérimentaux. L'équation 2.4 est le résultat d'une modification de l'équation originelle de la loi d'usure d'Archard présente dans l'article de A. *Zmitrowicz* [34]. La version dans le travail de *Kirk Fraser* est une extension de celle de la dernière étude citée pour inclure la dégradation de la résistance au fluage du matériau à température élevée tout comme la dureté du matériau.



Certains auteurs tentent d'être très précis en voulant prédire l'usure à l'aide d'équations de résistance des matériaux, c'est-à-dire purement physiques et mathématiques [35, 36]. Étant un phénomène complexe et qu'il y a un bon nombre d'équations à résoudre, les modèles numériques peuvent être intéressants. Chaque itération demande que les équations du modèle soient recalculées ce qui est parfaitement adapté pour une application informatique. Cependant, il est difficile de confirmer l'applicabilité de certaines formules en raison des conditions qui ne peuvent être véritablement observées et sont donc basées sur des hypothèses. La méthode de simulation numérique influence aussi beaucoup l'adaptabilité d'un modèle à différentes situations. La mise en équation utilisée dans *A numerical methodology for predicting tool wear in friction stir welding* [35, 36] s'utilise bien avec des outils de formes simples ce qui permet une discrétisation continue des outils et une meilleure précision. Toutefois, ces modèles ont été testés seulement dans un cas spécifique avec des outils simples et dans un assemblage bout à bout tout en obtenant des résultats probants, son domaine de validité n'a pas été clairement établi aux soudures qui possèdent sensiblement les mêmes conditions retrouvées pour calibrer le modèle.

Dans le domaine de la simulation numérique, deux types de techniques de modélisation sont habituellement utilisées, la dynamique des fluides et la mécanique des solides. Ces deux techniques impliquent des phénomènes non linéaires à considérer appartenant à trois catégories classiques : géométrique, comportement des matériaux ou contact linéaire [37]. Toutefois, les conditions limites dans la SFM sont complexes à définir. Le matériau à l'interface peut soit coller à l'outil (il a la même vitesse locale que l'outil) ou il peut glisser (la vitesse est plus faible) [38]. Sans essais expérimentaux, la simulation numérique se base sur des hypothèses et les résultats demeurent donc non corrélés avec la réalité et ne sont pas validés lorsque les comportements des matériaux ne sont pas entièrement connus.

## CHAPITRE 3 MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 3.1 Introduction

L'usure des outils est un des facteurs limitant l'implantation de la technologie du soudage par friction-malaxage en industrie puisque le changement de géométrie affecte la qualité des soudures. Afin d'évaluer l'usure dans des conditions qui sont susceptibles d'être retrouvées en usine, la méthode employée doit donc être conséquente de cet élément très important. De plus, afin de qualifier et quantifier la durée de vie, des méthodes précises de mesures doivent être utilisées. Cette section décrit en détail les méthodes et les matériels employés pour réaliser les objectifs fixés. Certains détails seront donnés sur des méthodes ou des mesures qui en nécessitent lorsque celles-ci seront présentées.

### 3.2 Matériaux

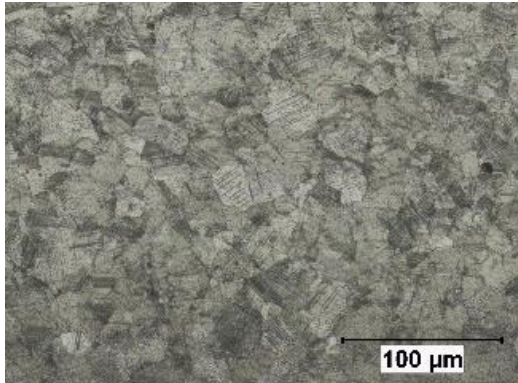
Cette section est dédiée à la présentation des matériaux dans les assemblages et aux outils utilisés de ce projet de recherche. Pour les matériaux d'assemblage, ces derniers ont été sélectionnés par certaines compagnies œuvrant dans le domaine automobile et du transport de surface via le groupe industriel ALTec du Conseil National de Recherche du Canada (CNRC) tel que mentionné précédemment. Les matériaux d'assemblage utilisés se divisent en deux familles : les alliages d'aluminium et les nuances d'acier. La composition chimique des alliages d'aluminium est présentée dans le tableau 3.1 et la composition chimique des nuances d'aciers ainsi que la microstructure est présentée dans le tableau 3.2.

*Tableau 3.1: Composition chimique des alliages d'aluminium utilisés dans les assemblages de la maîtrise (valeurs en % massique)*

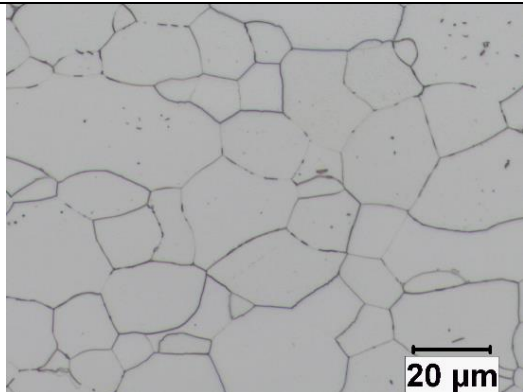
Alliages d'Aluminium	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al	Autres
AA5083 SPF	0,052	0,089	0,028	0,865	4,720	94,000	bal.
AA6082-T6	0,957	0,429	0,020	0,407	1,101	96,990	bal.

Tableau 3.2: Compositions chimiques et microstructures de A) acier inoxydable 201LN ¼ dur B) Acier bas carbone 1008 C) Acier galvanisé DP800 (valeurs en % massique)

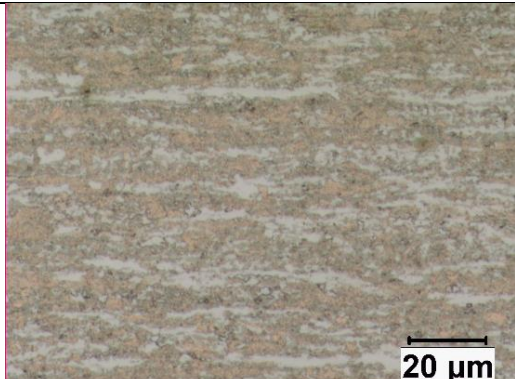
A)

Acier inoxydable 201LN					Microstructure
C	Si	Mn	S	Ni	
0,034	0,445	6,979	0,002	4,547	
Cr	Cu	Co	Mo	Fe	
16,771	0,040	0,118	0,375	70,200	
Bal. %					

B)

Acier bas carbone 1008					Microstructure
C	Si	Mn	S	Ni	
0,030	0,019	0,204	0,015	0,008	
Cr	Cu	Co	Mo	Fe	
0,019	0,009	0,002	0,018	99,616	
Bal. %					

C)

Acier galvanisé DP800					Microstructure	
C	Si	Mn	S	Ni		
0,147	0,219	1,793	0,012	0,026		
Cr	Cu	Co	Mo	Fe		
0,240	0,070	0,004	0,207	97,103		
Bal. %						

La microstructure des alliages d'aluminium n'est pas présentée puisqu'elle n'a pas été étudiée. Elle a été considérée comme négligeable étant donné que l'usure des outils au carbure (WC-25%Co) dans l'aluminium est nettement inférieure à celle obtenue dans les nuances d'acier. Toutefois, la

composition chimique des alliages d'aluminium peut jouer un rôle indirect sur la durée de vie des outils en créant une réaction avec les composés retrouvés dans les nuances d'acier utilisées. En effet, aux températures atteintes pendant le soudage par friction-malaxage d'un assemblage aluminium-acier, des composés influençant la résistance statique des assemblages peuvent se former. Un exemple discuté au chapitre précédent est les intermétalliques. Ces composés peuvent jouer un rôle dans la résistance à l'interface des assemblages, mais ne participent en aucun cas à l'usure des outils puisqu'ils se forment généralement après le passage de l'outil. Les compositions chimiques données au tableau 3.1 sont le résultat d'une analyse par spectroscopie par émissions optiques (SEO) pour confirmer la présence de magnésium, par exemple, dans l'alliage d'aluminium de série AA5xxx. La terminologie SPF désigne que l'alliage a été développé pour le formage superplastique, soit avec une microstructure initiale spécifique permettant l'atteinte de grains fins après le formage [39]. Typiquement, les alliages superplastiques doivent être capables de soutenir un niveau de déformation très élevé ( $\geq 100\%$ ) avec des vitesses de déformations faibles ( $\leq 0.001/s$ ). [40]. La feuille d'aluminium de série AA6xxx contient du silicium et du magnésium. Le traitement thermique T6 produit la précipitation des éléments chimiques susmentionnés pour améliorer les propriétés mécaniques finales. La première nuance d'acier couvert dans cette étude est l'acier inoxydable 201LN (basse teneur en azote) ¼ dur. La grande concentration chrome qu'il contient procure la propriété d'inoxidable à cet acier. La figure contenue dans la portion A) du tableau 3.2 montre la microstructure austénitique de l'acier inoxydable 201LN ¼ dur. Cette microstructure possède des grains de formes irrégulières uniformément distribués. Les grains montrant différentes couleurs ont une orientation différente des autres grains. On remarque un certain écrouissage par l'apparition de macles dû à la déformation à froid (appellation ¼ dur). Cet écrouissage confère des propriétés mécaniques élevées à ce grade d'acier.

L'acier bas carbone 1008 est essentiellement composé de grains ferritiques comme on peut le voir clairement au tableau 3.2.

L'acier galvanisé DP800 possède une microstructure bi-phasée. Celle-ci est composée à environ 50% de ferrite et 50% de martensite. Ces compositions ont été déterminées à partir d'analyses obtenues en nano-indentation à partir d'un système Anton Paar (modèle NHT<sup>3</sup>) selon la norme ISO 14577 et sont présentées à la figure 3.1.

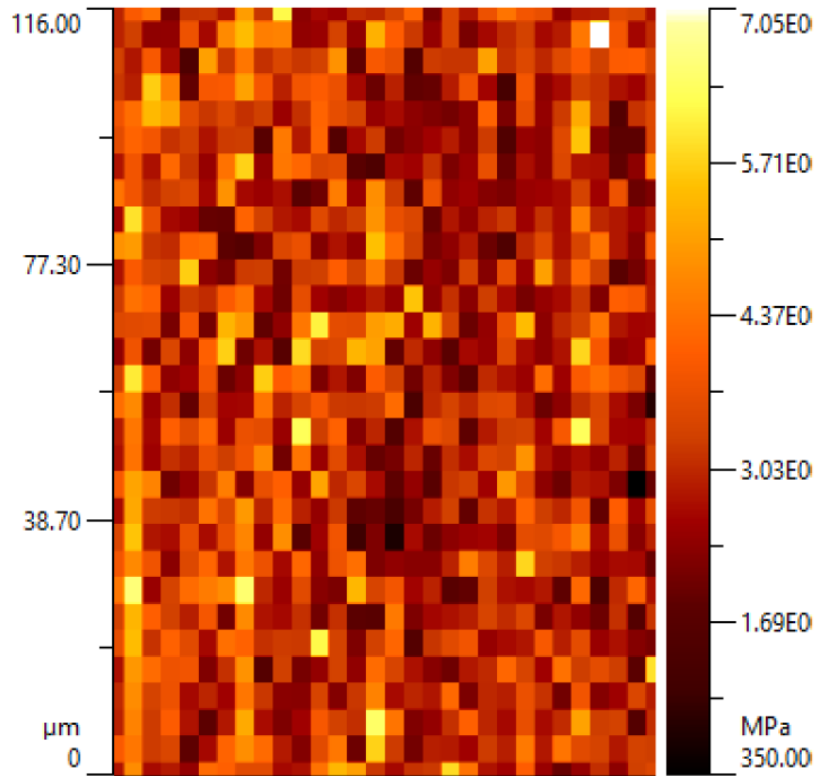


Figure 3.1: Mesures en deux dimensions de nano-indentation montrant la microstructure bi-phasée : ferrite en rouge et martensite en jaune

### 3.3 Propriétés des matériaux

Les matériaux d'assemblage utilisés dans ce projet de recherche ont été sélectionnés dans le but de couvrir une large gamme de propriétés mécaniques possibles pour les grades d'acier. Il est donc important de connaître les valeurs de départ en effectuant les tests adéquats. Des essais de traction simple ont été effectués sur les matériaux de base en utilisant la norme ASTM E8 sur une machine de marque *MTS Insight 50 W Multihead* à 2.0mm/min. Cette norme s'applique aux essais de traction simple à température pièce, la figure 3.2 illustre un schéma des échantillons.

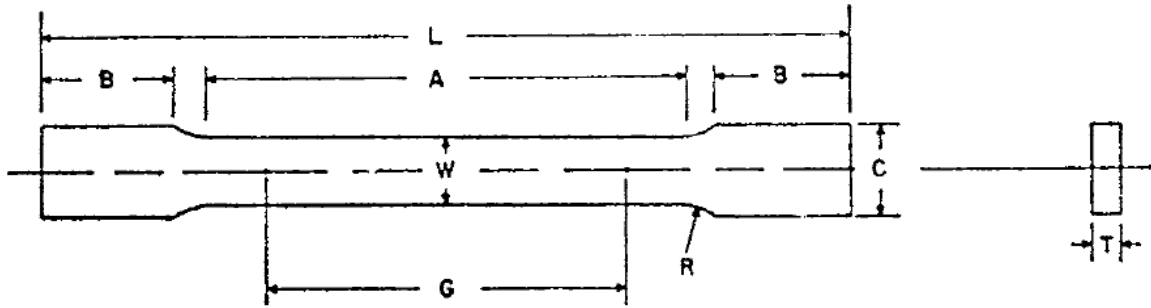


Figure 3.2: Schéma d'un échantillon de la norme ASTM E8 [41]

Dans le cadre de la maîtrise, les échantillons de traction ont été mesurés au milieu, à la jonction entre les deux matériaux d'assemblage et ne possède pas de section réduite. La section centrale est légèrement polie sur les côtés afin de minimiser les erreurs de mesure avec le pied à coulisse et d'éviter une source trop importante d'initiation de contrainte. La norme stipule que les échantillons doivent posséder une épaisseur nominale entre 0.13mm et 19mm, l'essai doit se dérouler jusqu'à rupture de l'échantillon. Un résumé des résultats est assemblé dans le tableau 3.3 qui donne les propriétés mécaniques de base, les conditions géométriques ainsi que la direction du laminage dans lesquelles elles ont été obtenues. Les données complètes comme les dimensions des échantillons et une courbe de tractions typique lors des essais sont contenues à l'annexe A. L'orientation du test longitudinale est celle du laminage et la direction transversale fait référence à la section perpendiculaire.

Tableau 3.3: Propriétés mécaniques des matériaux de base utilisés dans les assemblages

Matériaux	Orientation du test	Épaisseur (mm)	Largeur de l'échantillon (mm)	Limite d'élasticité (MPa)	Limite ultime (MPa)	Allongement à la rupture (%)
AA6082-T6	Longitudinale	1,51	12,66	312,7	339,2	12,3
	Transversale	1,50	12,67	314,2	341,8	12,1
AA5083 SPF	Longitudinale	1,74	12,75	149,6	301,1	23,8
	Transversale	1,73	12,73	148,1	292,0	24,2
Al201LN	Longitudinale	2,22	12,77	531,8	911,8	54,3
	Transversale	2,32	12,76	572,3	819,9	45,6
ASTM A1008	Longitudinale	2,16	12,74	209	329,6	37,9
	Transversale	2,15	12,63	216,1	333,5	36,9
DP800 Galvanisé	Longitudinale	2,06	12,63	548,8	922,7	14,6
	Transversale	2,06	12,68	585,1	943,2	15,1

L'analyse des limites ultimes des matériaux présentés permet de faire ressortir la différence non négligeable de l'acier inoxydable 201LN lorsque testé longitudinalement par rapport à lorsque testé transversalement. Les feuilles de cet acier impliquent un travail mécanique à froid dû à son appellation ¼ dur. Étant donné que la direction de roulement se fait toujours dans le même sens, l'écrouissage des grains permet d'obtenir une meilleure résistance ultime dans le même sens que la direction du laminage. La direction transversale n'ayant pas été sujette au même travail mécanique que la direction longitudinale, elle possède une résistance à la rupture plus faible, bien que le DP800 ait été produit par le même procédé, la différence en limite ultime longitudinale et transverse est très similaire. Il en résulte du fait que ce matériau possède une microstructure à doubles phases où une des deux phases est moins résistante que l'autre. Lors de l'écrouissage du matériau, la phase moins résistante, la ferrite, se déforme bien davantage que la phase plus résistante, soit la martensite qu'on peut distinguer à la figure 3.3 (phase marron). Ce qui en résulte un changement géométrique de la ferrite contenue dans la microstructure et pas nécessairement de la martensite.

Le matériau de l'outil a été le même pour toutes les expérimentations effectuées. Il s'agit du carbure de tungstène allié à 25% en volume de cobalt (WC-25Co) fourni par la compagnie *Vista Carbide*. La sélection de cette composition a été guidée par la disponibilité des différentes compositions ainsi que par les caractéristiques techniques, la dureté et la ténacité, données par le fournisseur correspondant à notre application. Pour des raisons de limitations techniques, seule la dureté du WC-25Co a pu être trouvée grâce à un appareil de dureté Vickers *Clemex CMT* avec analyseur d'image, mesures qui seront présentées prochainement. Les échantillons utilisés pour quantifier la dureté du WC-Co proviennent des outils qui ne pouvaient plus servir pour la soudure. Les outils ont été coupés en deux sur le sens de la longueur, enrobés à chaud puis polis sur une polisseuse automatique suivant une séquence de polissage développée au CNRC. Malheureusement pour les lecteurs, cette séquence ne peut être divulguée. Étant donné que les outils ont subi les effets d'une chaleur élevée, une vérification sur la réduction de la dureté a été effectuée. Une référence consultée [28] expose que l'augmentation de la température diminue de façon importante la dureté du WC-xCo peu importe le pourcentage de cobalt.

Position p/r à l'extrémité	Dureté de l'échantillon A en HV (Vickers)	Dureté de l'échantillon B en HV (Vickers)
15 $\mu\text{m}$ (A)	N/D	1095
30 $\mu\text{m}$ (B)	967	N/D
80 $\mu\text{m}$ (C)	955	985
Centre de l'échantillon (D)	985	1003
Moyenne	<b>969</b>	<b>1028</b>
% de réduction	<b>3,1%</b>	<b>10,7%</b>

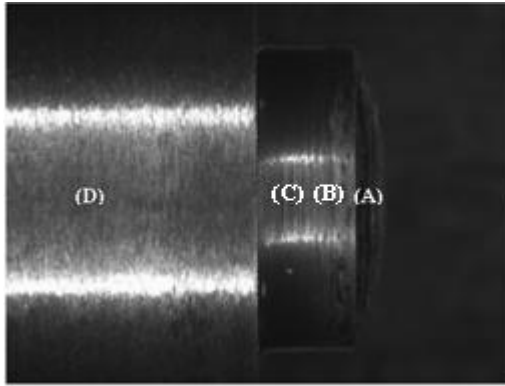
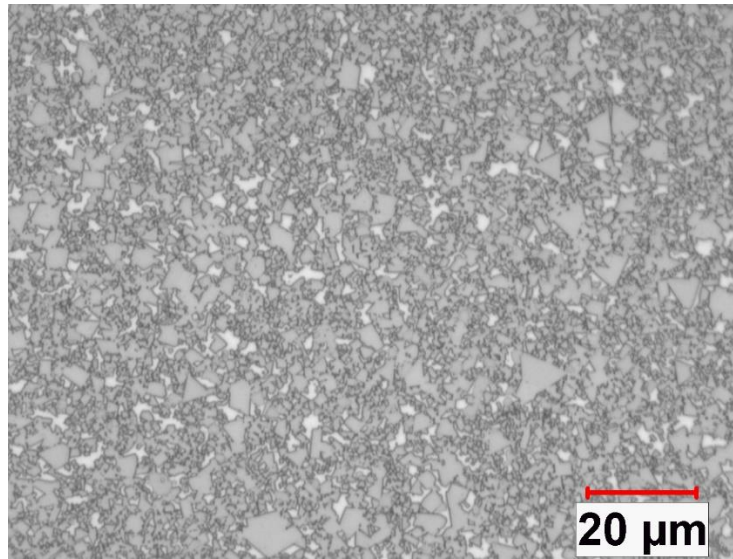


Figure 3.3: Résultats des tests de microdureté sur le WC-Co et la position des tests





*Figure 3.4: Microstructure du WC-25%Co des outils*

La figure 3.4 montre la microstructure du WC-Co utilisé dans nos outils. Les zones en gris foncé illustrent les particules de carbure de tungstène tandis les zones en gris pâle constituent la matrice de cobalt. Cet échantillon montre que la taille des grains n'est pas constante.

### **3.4 La méthode générale**

La méthode utilisée au cours de cette recherche devait permettre d'étudier l'usure des outils dans un contexte orienté industriel. Pour ce faire, différents paramètres ont été ciblés grâce à une revue de la littérature. Par la suite, une loi ou une méthode de prédiction de l'usure utilisant ces différents paramètres devait être proposée. Des objectifs intermédiaires ont été posés pour segmenter la recherche et rendre le processus plus simple. Les prochains paragraphes expliqueront d'abord les objectifs intermédiaires en surface, puis en profondeur par la suite.

En premier lieu, il était important de pouvoir quantifier et qualifier l'usure dans des conditions qu'il est possible de retrouver en industrie. Pour chaque combinaison de matériaux ciblée par nos partenaires industriels, une fenêtre opératoire a été produite où la résistance et les défauts ont été analysés en fonction de combinaisons de paramètres opératoires utilisées. Ces fenêtres opératoires sont obtenues par un processus de tests et d'analyses décrit plus loin dans ce chapitre. Dans un deuxième temps, des essais d'usure des outils ont été effectués sur les trois

couples de matériaux. Par expérience, il a été vite observé que l'usure a un impact majeur seulement sur l'extrémité de l'outil.

En mesurant l'état de départ de l'outil avant les essais de soudage, un portrait de la géométrie de celui-ci peut être dressé puis être comparé avec des mesures géométriques effectuées tout au long de ces essais. En ce qui concerne les essais de soudage, ceux-ci consistent aux soudures effectuées à répétition avec le même outil, avec les mêmes paramètres opératoires et les mêmes matériaux d'assemblage. L'usure prend place toujours au pion de l'outil, mais diffère dépendant des couples de matériaux, la vitesse de rotation ainsi que la longueur cumulée de soudure. Les outils ont donc été testés jusqu'à ce qu'il n'y ait plus assez de longueurs de pion pour produire une soudure similaire à la soudure de référence au niveau de son apparence. Finalement, une équation a pu être utilisée et modifiée afin de prendre en compte différents paramètres qui sont déterminants pour l'usure. Il est important de mentionner qu'un système de mesures de température a été installé sur la soudeuse pour donner davantage d'informations sur les conditions de travail de l'outil à l'intérieur des soudures. Aussi, différentes méthodes de mesures de l'usure des outils ont été essayées afin de trouver la méthode de mesure la plus précise et répétable.

### 3.5 La méthode détaillée

Cette section est consacrée à la description en détail des méthodes qui ont été utilisées pour tester l'usure dans des conditions semblables aux cas industriels. Afin de mesurer adéquatement cette usure, des fenêtres opératoires ont été déterminées pour chaque couple de matériaux utilisés. Le tableau 3.4 présente ces couples de matériaux.

Tableau 3.4: Couples de matériaux utilisés

Couple de matériaux	Matériaux
#1	AA6082-T6 / A1008
#2	AA5083 <i>SPF</i> / SS201LN ¼ dur
#3	AA6082-T6 / DP800 Galvanisé

### 3.5.1 La méthode de soudage

La même procédure de soudage a été conservée autant pour les essais préliminaires que pour les essais d'usure des outils. La soudeuse utilisée est une MTS I-Stir PDS montrée à la figure 3.5. Cette soudeuse de type portique a plusieurs modes de contrôle, mais ceux utilisés ont été en position et en force. Lorsque la soudeuse est contrôlée en position, la profondeur de l'outil est gardée constante. Puisque les forces sur les outils sont, entre autres, fonction de la profondeur de plongée, les forces varient également. Quand le contrôle s'effectue en force, la profondeur de l'outil change en temps réel pour maintenir une force constante.

Afin de réduire au maximum les pertes de matériaux, des soudures sur coupons sont produites. Un coupon est une petite pièce de matériau utilisée pour réaliser des soudures expérimentales avant de les appliquer sur les vrais assemblages. La figure 3.6 montre des soudures sur coupons. Une précision importante à effectuer est que les soudures ont tous été produites en recouvrement avec la feuille d'aluminium sur le dessus et la feuille d'acier sous l'assemblage. Ces soudures permettent de déterminer de façon préliminaire la force nécessaire à appliquer pour produire une soudure d'aspect acceptable en faisant varier la profondeur de plongée au cours d'une soudure. Plusieurs éléments sont vérifiés d'emblée pour confirmer la qualité de la soudure. Parmi les éléments vérifiés, la quantité de bavures laissées sur le bord des soudures et la taille de l'empreinte de l'épaulement lors du retrait de l'outil à la fin de la soudure en sont deux qui sont facilement inspectés immédiatement après la soudure.



Figure 3.5: Soudeuse de type portique de marque MTS et de modèle I-Stir PDS

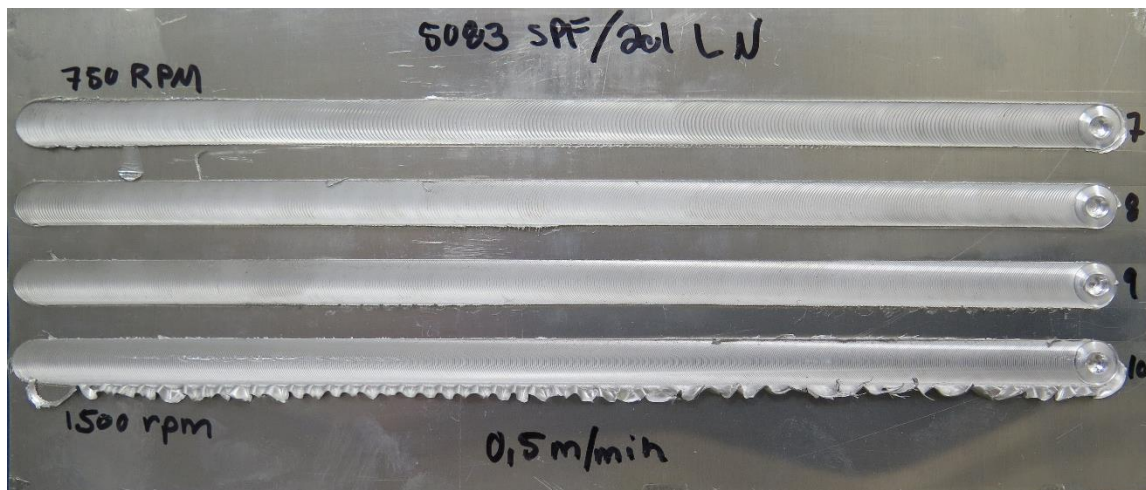


Figure 3.6: Soudures sur coupons

Une plage raisonnable de paramètres opératoires est essayée sur les soudures sur coupons. Le point de départ de ces combinaisons de paramètres opératoires est généralement établi par le personnel de soutien du CNRC par rapport aux matériaux en jeux ainsi qu'en considérant les épaisseurs des matériaux d'assemblage. Pour les couples de matériaux décrits dans le tableau 3.4, les soudures sur

coupons qui servent en analyse préliminaire sont produites en fixant une vitesse de rotation et une vitesse d'avance basses. Par la suite, une autre soudure est produite en conservant la même vitesse d'avance, mais en augmentant par incrément constant la vitesse de rotation.

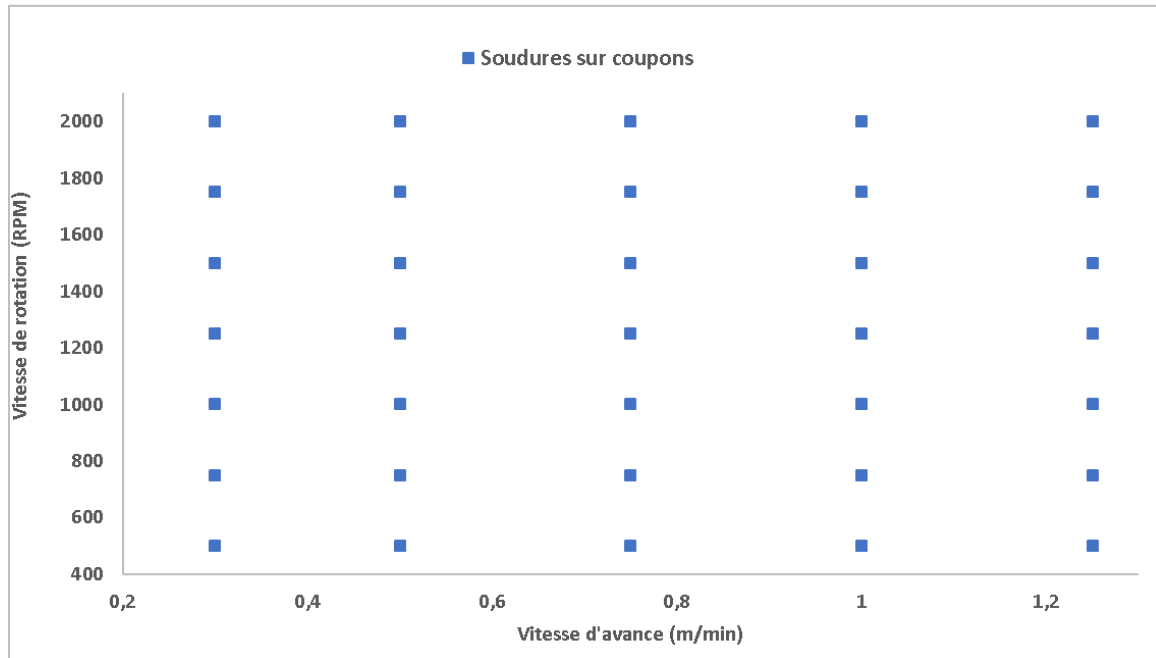


Figure 3.7: Combinaisons de paramètres opératoires testées pour chaque couple de matériaux d'assemblage

À la figure 3.7, chaque carré bleu représente une soudure qui a été testée en contrôle de position. Chaque couple de matériaux d'assemblage a fait l'objet d'essais de soudage utilisant l'ensemble de ces combinaisons de paramètres opératoires pour chacun d'eux. Comme décrit précédemment, l'aspect de surface est analysé en fonction de la profondeur de plongée. Cette dernière génère une force verticale puisque plus de force sera produite si l'outil tourne plus profondément dans l'assemblage. Puisque l'outil est rentré plus creux dans l'assemblage, l'épaulement est aussi inséré davantage dans la feuille du dessus et ainsi crée plus de bavures. La profondeur de plongée est déterminée de façon préliminaire en connaissant la longueur du pion, l'épaisseur totale de l'assemblage et la géométrie de l'épaulement. Étant donné que la profondeur de plongée de l'outil varie au cours d'une soudure à cette étape de la recherche, la quantité de bavures varie aussi. On

peut d'ailleurs le constater en regardant la figure 3.6, il y a une augmentation de la quantité de bavures en comparant la soudure 10 à la soudure 7. Avant de commencer chaque soudure, la hauteur zéro de l'outil est établie à l'extrémité du pion. La machine descend l'outil jusqu'à ce qu'elle rencontre une certaine résistance (0,5kN) et c'est à ce moment que l'extrémité est fermement appuyée contre l'assemblage. La remise à zéro de la hauteur de l'outil se fait toujours de cette manière à chaque soudure. Par la suite, l'outil en rotation plonge dans les pièces à assembler en respectant une profondeur et un temps de plongée déterminés par le code du programme préalablement ajusté. Lorsque l'outil commence à progresser dans la ligne de soudure, il est possible de faire varier en temps réel la profondeur de l'outil en fonction de l'aspect de surface de la soudure et de la quantité de bavures que ce changement de profondeur occasionne. Ensuite, lorsque la soudure est complétée, l'aspect de la soudure peut être analysé qualitativement et procurer des informations pouvant être utilisées pour déterminer en premier lieu quand l'outil était assez profond en fonction de la distance parcourue de l'outil à partir de son point de départ. Avec l'acquisition de données effectuée pour l'ensemble des soudures, la force verticale spontanée peut être associée à la position ciblée par l'analyse de l'aspect de surface. Il est important de noter que la base du code de programmation des soudures a été conservée tout au long de la maîtrise. De cette manière, on s'assurait de conserver certains éléments opératoires pour l'ensemble des soudures comme l'angle d'inclinaison de l'outil (figure 3.8) et un délai constant entre les soudures. Ce dernier point permet d'avoir une température relativement constante sur le support envers (figure 3.9) entre les soudures. En ce qui concerne les paramètres opératoires de base comme la vitesse de plongée (200,0mm/min), le temps de maintien en début de soudure (3 secondes) et les accélérations des différentes vitesses (vitesse d'avance et vitesse de rotation). Certaines règles de contrôle des machines ont été suivies qui n'ont pas trop de sens au niveau pratique. Notamment, pour atteindre la vitesse de rotation de l'outil ou la vitesse d'avance, la valeur de l'accélération était toujours le double de la valeur de ces vitesses.



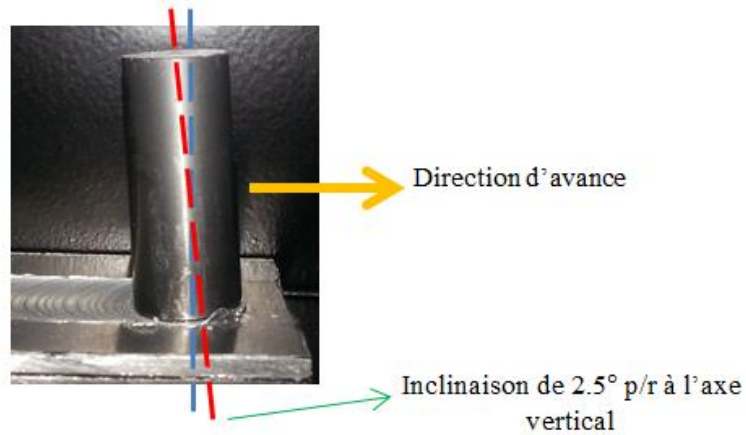


Figure 3.8: Illustration de l'inclinaison de l'outil



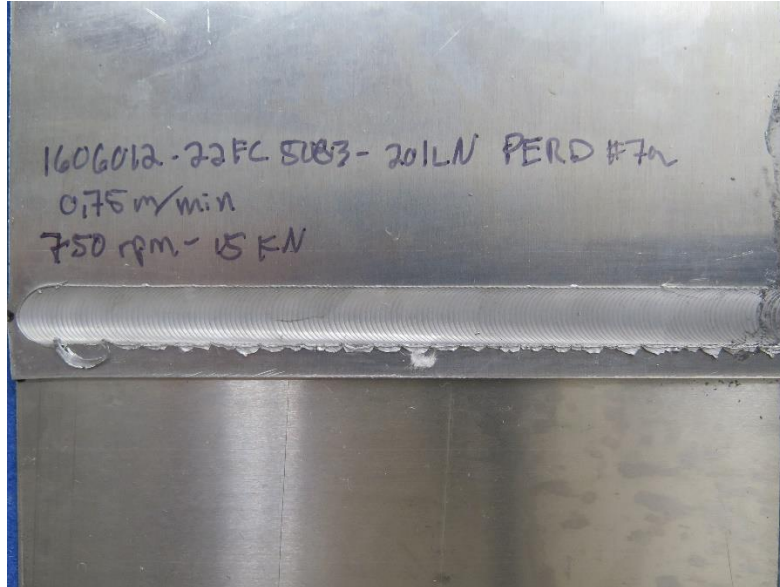
Figure 3.9: Étaux et support envers utilisés pour fixer solidement les tôles à la table amovible

### 3.5.2 La méthode de sélection des soudures

À la suite des soudures sur coupons, les soudures qui donnent les moins bon finis de surface sont refaites en utilisant toujours le contrôle en position de la soudeuse. Après un nombre d'essais

raisonnables et une grande plage de profondeurs testée, la combinaison de paramètres opératoires qui produit la soudure donnant toujours de mauvais résultats est écartée.

Avec l'étape précédente qui servait à cibler une force verticale associée à la profondeur de pénétration adéquate, les soudures retenues sont reproduites une à une comme le montre la figure 3.10.



*Figure 3.10: Soudure unique produite en contrôle de force*

Ces soudures sont produites en appliquant sur l'outil une force verticale constante contrôlée par le système de rétroaction de la soudeuse. Il est important de mentionner que la même combinaison de vitesse d'avance et de vitesse de rotation peut admettre une petite plage de forces verticales qui donnent sensiblement la même soudure. C'est-à-dire que la soudure montrée à la figure 3.10 a été produite à 15 kN de force verticale et qu'elle aurait pu donner le même résultat si elle avait été produite avec une force de 14 kN ou de 16 kN. Cette plage de forces dépend de plusieurs paramètres qui n'ont pas été testés dans le cadre de ce projet.

L'utilité de reproduire les soudures en contrôle de force est que le résultat est constant tout au long de la soudure. Plusieurs éléments expliquent que les soudures sont plus constantes en contrôle de force. Notamment, puisque la pression sur l'épaulement est constante, la chaleur générée par la rotation de l'outil l'est aussi. De ce fait, la chaleur est également distribuée le long



de la ligne de soudure, ce qui crée des soudures ayant des propriétés mécaniques et métallurgiques uniformes. Cette constance nous permet de couper des échantillons perpendiculairement à la direction de la soudure et de pouvoir effectuer des essais de traction statique, des mosaïques de la microstructure et des essais de fatigue lorsque désiré. Cette caractérisation de la soudure permet de confirmer ou d'infirmer certaines hypothèses considérant l'aspect de surface, la remontée d'interface, la création d'intermétalliques ainsi que la résistance de la soudure. Cette résistance prend en comptes la perte en propriétés mécaniques du matériel de base dû à la chaleur. L'aluminium traité thermiquement perd particulièrement beaucoup en propriétés mécaniques lorsqu'elle est soumise à de la chaleur et la résistance du matériau est réduite considérablement en fonction des zones de soudures (figures 2.2) La zone affectée thermiquement (ZAT) est la partie de l'assemblage la plus affectée par la chaleur. L'assemblage est donc moins résistant avec une combinaison de paramètres opératoires générant un apport de chaleur plus élevé. D'autres éléments influencent la résistance de l'assemblage comme les phases intermétalliques à l'interface de la soudure. Ceux-ci peuvent réduire la résistance statique et la durée de vie en fatigue des assemblages puisque les phases intermétalliques présentes sont fragiles réduisant ainsi leur ductilité. Ceci peut mener à l'atteinte d'une rupture fragile en service. La détection des phases intermétalliques se fait par un protocole d'analyse utilisant un microscope électronique à balayage (MEB) de marque Hitachi de modèle SU-70. La mosaïque des microstructures a été faite avec un microscope optique Olympus BX-51 couplé à un analyseur d'image Clemex. Les essais de tractions statiques ont été faits sur la *MTS Insight 50 W Multihead* montrée à la figure 3.11.



*Figure 3.11 : Appareil d'essai de traction statique MTS Insight 50W Multihead*

En utilisant ce protocole d'analyse systématiquement pour chaque combinaison de paramètres qui ont été réalisée en contrôle de force, les défauts internes et externes, la résistance des soudures ainsi que les forces latérales, les forces agissant dans l'axe X (perpendiculaire à la ligne de joint) et transverses, les forces agissant dans l'axe Y (contre l'outil dans l'axe de la ligne de soudure), nous procurent une cartographie des bonnes combinaisons de paramètres. Les forces mesurées peuvent ensuite être comparées aux forces admissibles approximatives sur un robot soudeur par friction-malaxage. L'applicabilité potentielle à un système robotique est traitée en partie dans cette maîtrise étant donné qu'elle était importante pour certains clients industriels du groupe de recherche ALTec. L'ensemble des résultats pour cette section sera présenté entièrement au chapitre suivant.

### **3.5.3 Méthode de production des échantillons à des fins d'analyses**

Après la production des soudures en contrôle de position, celles-ci sont coupées en sections perpendiculaires au sens de la soudure. Trois d'entre elles serviront aux essais de traction. Un autre échantillon servira pour les analyses au microscope. Une règle qui a été observée tout au long de cette étude est que les échantillons ont été pris à une distance d'au moins 50mm du début de la

soudure et à au plus 50mm de la fin de la soudure. Ces distances sont respectées pour s'assurer d'avoir des échantillons avec des propriétés constantes. Les extrémités de la soudure subissent des charges thermiques différentes qu'au centre de la soudure. Afin de s'assurer d'éliminer complètement ces zones en régime transitoire, il a été considéré que 50mm était suffisant. La distance de stabilisation de la température ainsi que la dissipation plus rapide des extrémités de la soudure expliquent en partie pourquoi le début et la fin ont des propriétés différentes du reste de la soudure. Avant de passer sous les microscopes, ces échantillons doivent être préparés adéquatement. Premièrement, l'excès de matériel de part et d'autre de la soudure est retiré. Par la suite, l'échantillon ayant une petite taille, est recouvert à chaud dans une enrobeuse automatique à l'aide d'une poudre noire pouvant être fortement compactée. L'échantillon est ainsi entièrement recouvert. Le résultat est de petites rondelles d'environ 25mm de diamètre pouvant par la suite être polies. La séquence de polissage a permis de polir chaque échantillon de la même manière. Il serait trop fastidieux de décrire les séquences de polissage intégralement. Le plus important à retenir est que la séquence de polissage utilisée permet d'enlever d'aplanir les échantillons dans un premier temps. Dans un deuxième temps, les grosseurs de grains sont augmentées en variant le temps de polissage et la pression exercée sur les échantillons. Les rondelles sont d'abord disposées sur une surface totalement plane pour être fixées dans cette position dans un porte-échantillon. Par la suite, ce dernier est inséré dans la polisseuse automatique. Cette polisseuse possède des séquences prédéfinies qui ajuste les différents dosages de liquides utilisés pour obtenir un fini miroir comme le liquide colloïdal qui est utilisé avec le tapis de polissage 9 microns et l'eau. Plusieurs grosseurs de grains sont utilisées et sont employées du plus gros au plus petit pour graduellement rendre la surface des échantillons le plus lisse possible.

#### **3.5.4 Méthode de sélection des combinaisons de paramètres pour les soudures d'usure**

Une fois que les fenêtres opératoires ont été déterminées pour chaque couple de matériaux, la sélection des combinaisons de paramètres pour les soudures d'usure devait être effectuée en

considérant l'applicabilité en usine afin de mettre les outils à l'épreuve dans des conditions de production. Suivant les requis en productivité des clients ainsi que l'analyse approfondie des fenêtres opératoires, quatre combinaisons de paramètres furent sélectionnées à partir des propriétés mécaniques résultantes et pour l'absence de défaut en surface et à l'interface aluminium-acier des matériaux. Le nombre de combinaisons de paramètres a été instauré afin de minimiser le nombre de soudures produites tout en ayant assez d'informations pour construire une équation prédictive pour les trois couples de matériaux et une combinaison de paramètres opératoires pour confirmer cette équation.

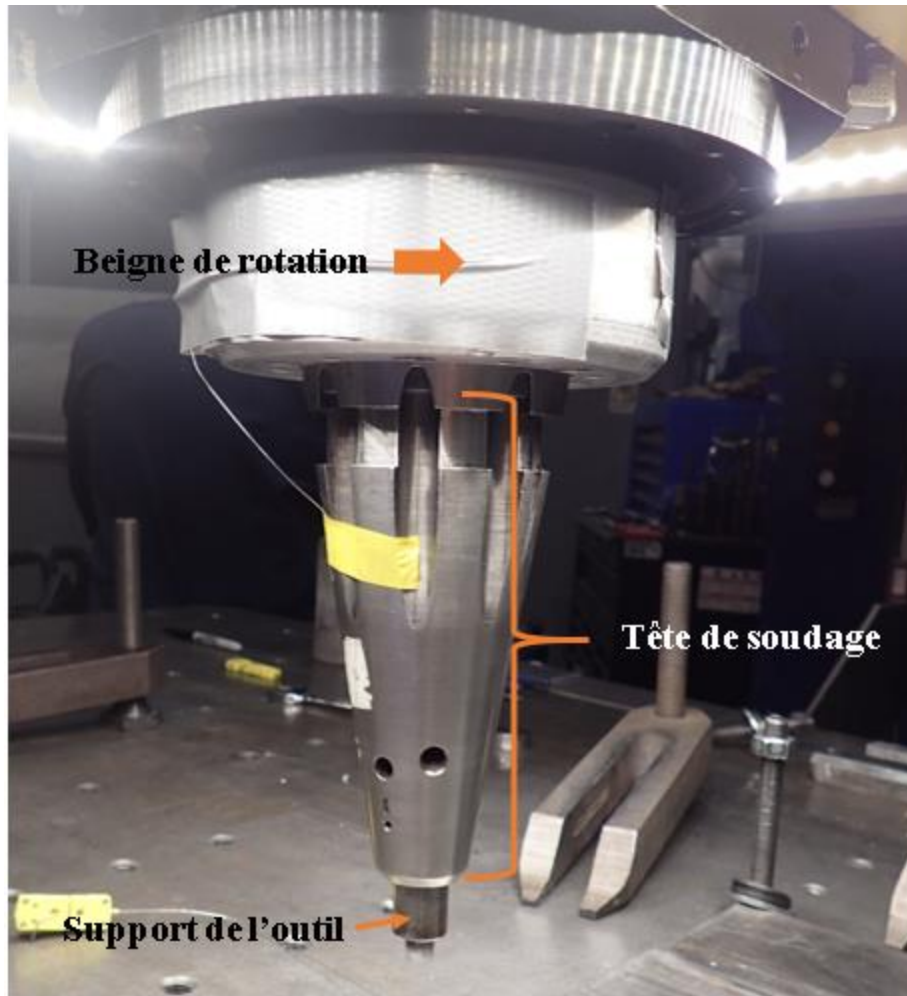
Pendant l'étape qui vient d'être décrite, un système de mesure de température a été installé sur la soudeuse. La température intra-outil nous permet d'approximer par extrapolation la température à l'interface entre l'extrémité de l'outil et le matériau. L'apport de chaleur théorique de l'outil en fonction des paramètres opératoires est donné par l'équation 2.1. Cette température est lue par un thermocouple de type K relié à un transmetteur sans-fil collé sur la tête rotative de la soudeuse. Le transmetteur utilisé est un LORD MicroStrain fonctionnant avec un protocole de communication Bluetooth possédant une batterie interne. Le thermocouple est branché dans le transmetteur qui est en lecture continue et transmet ces données à haute fréquence. Nous pouvons donc avoir un suivi en temps réel de la température. Le transmetteur illustré à la figure 3.12 et le récepteur illustré à la figure 3.13 reçoit ces informations et les transmet à l'ordinateur pour pouvoir associer un temps et une position sur la soudure à une température. Avec le thermocouple, ces deux éléments composent le système de lecture de température intra-outil.



Figure 3.12: Transmetteur sans-fil de la température intra-outil



Figure 3.13: Récepteur sans-fil pour la lecture de la température intra-outil



*Figure 3.14: Transmetteur et thermocouple installé sur la tête et à l'intérieur de l'outil*

Ce qu'on voit à la figure 3.14 est la tête de soudage combinée avec le thermocouple. La tête de soudage est le mandrin conique reliant le support de l'outil au beigne de rotation du portique de soudage. Le thermocouple est branché dans le transmetteur et passé à l'intérieur du mandrin pour aller s'insérer à l'intérieur de l'outil par le trou prévu à cette fin. La figure 3.14 montre aussi l'installation du transmetteur et du thermocouple sur la soudeuse sous le ruban gris collé sur le beigne de rotation. Considérant que l'outil est composé d'un matériau très résistant, il était très difficile de percer un trou au centre de l'outil avec un foret. Nous avons donc fait appel à la technologie d'électroérosion pour arriver à percer à l'emplacement désiré. Le trou en question est situé dans le centre du corps de l'outil et descend jusqu'à la base de l'épaule

perpendiculairement à la surface plane de la tête. La figure 3.15 est une représentation du trou percé et de l'emplacement du thermocouple.

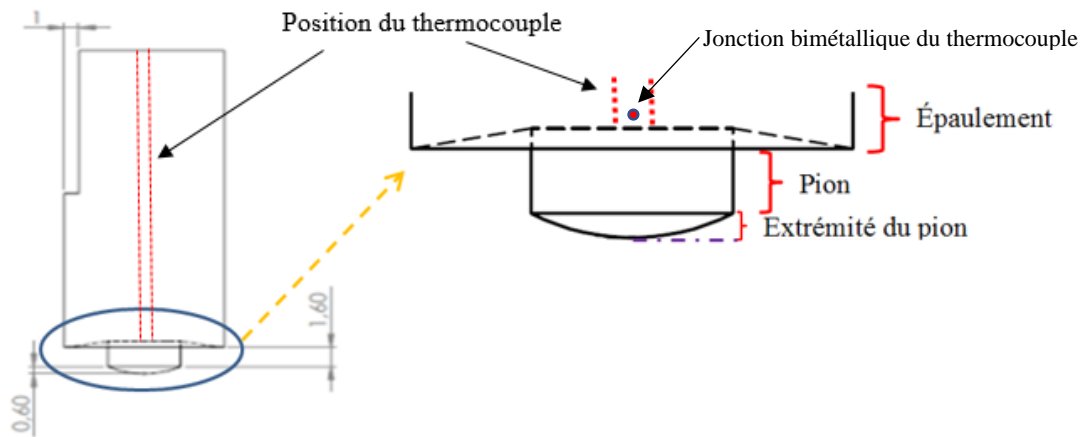


Figure 3.15: Emplacement schématisé du thermocouple

Les thermocouples utilisés sont de type K et ont un diamètre de 0,51mm. Une pâte conductrice est introduite en même temps que le thermocouple dans un trou de 0,6mm de diamètre. Il y a donc un espacement entre le thermocouple et l'interface des matériaux équivalente à au plus la hauteur totale du pion qui est de 2,2mm. Plusieurs essais de mesure de température à l'interface, en positionnant un thermocouple à cet endroit, ont été fait ce qui a pris beaucoup de temps sans avoir de résultats concluants et répétitifs.

La figure 3.16 montre comment le thermocouple fut installé avant que la soudure soit produite.

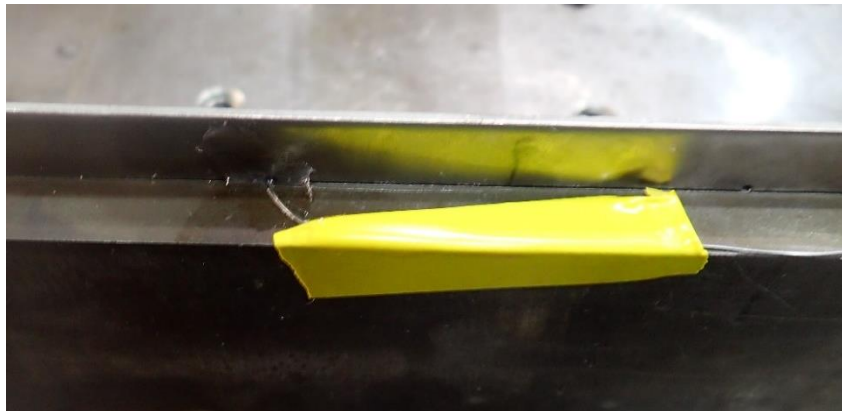


Figure 3.16: Thermocouple fixé sous la feuille d'acier avant un essai de mesure de température à l'interface

Ceux-ci étaient insérés à l'intérieur du trou à travers l'épaisseur de la plaque puis fixés légèrement pour permettre leurs mouvements lors du passage de l'outil par-dessus leur extrémité. Cette méthode permettait, a priori, un libre mouvement de haut en bas du thermocouple. Cet essai n'a pas bien fonctionné puisqu'il n'a pas été possible de reproduire cette expérience à plusieurs reprises. Les lectures de température qui ont été concluantes ont toutes été effectuées sur des outils n'ayant subi presque pas de dommage dû à l'usure. En effet, ces outils ont été vérifiés par microtopographie 3D, le même système utilisé pour suivre la progression de l'usure qui va être décrite dans la section suivante. Les résultats de ces lectures de températures ainsi que l'extrapolation pour la température à l'interface seront présentés au chapitre suivant.

### **3.6 Les soudures d'usure et les mesures d'usure**

Ces soudures servent uniquement à user l'outil dans des conditions de production industrielle. Un outil neuf est d'abord mesuré par un appareil de microtopographie 3D couplé à un analyseur d'image, le logiciel *MountainMaps®*. En conservant les paramètres constants, les soudures d'usure sont effectuées par longueurs courtes d'environ 300mm. La vitesse de pénétration de l'outil dans la phase de plongée, la vitesse de rotation, la vitesse d'avance, la force verticale appliquée ainsi que la phase de retrait de l'outils ont tous demeurés constante à travers les soudures d'usure pour un couple de matériaux. Une période d'attente constante a aussi été respectée pour avoir une température de la plaque de support relativement égale lors de la phase de plongée. Malheureusement, ces températures n'ont pas été mesurées directement.

#### **3.6.1 Lecture de l'usure par profilométrie**

La méthode de mesure de l'usure ici utilisée s'appelle la profilométrie et est basée sur la lecture de l'ensemble des profils enregistrés par le système de mesures. Celui-ci mesure les hauteurs et les creux sur une trajectoire rectiligne sur une distance donnée ce qui génère un profil. Cette trajectoire est reproduite parallèlement côte à côte à des intervalles de distances réguliers sur le domaine de mesure déterminé par l'utilisateur. L'assemblage de tous les profils forme ainsi une



reconstruction en trois dimensions de la surface. En utilisant les données brutes des hauteurs, des creux et de l'intensité de la réflexion du rayon, il est possible d'obtenir plusieurs reconstitutions de la surface en post-traitement ce qui rend la méthode très puissante. L'étendue des types de résultats est vaste avec la profilométrie, mais pour donner une idée, sans s'y limiter, elle peut donner la reconstitution en trois dimensions d'une surface, procurer des informations quantitatives de l'espace analysé comme le volume, la superficie, les points hauts, les points bas ainsi que la rugosité de la surface en fonction de sa réflectivité du rayon optique. Il est important de mentionner que le logiciel d'analyse est autant important que l'instrument de mesurer étant donné que c'est grâce à la manipulation informatique des données avec le logiciel qui donne des résultats exploitables. L'appareil de mesure est présenté à la figure 3.18 et les pièces importantes y sont indiquées. Le cadre qui supporte le crayon optique doit être très rigide pour éviter la transmission des vibrations et ainsi fausser les mesures. Un système de support pneumatique permet aussi de couper le lien physique direct avec le sol pour réduire l'influence des déplacements dans le local sur les mesures. Le positionnement des différentes pièces mobiles se fait à partir d'une manette de contrôle dont la vitesse de déplacement peut être réduite afin d'avoir plus de précision. Ces pièces mobiles modifient la position dans l'espace de l'échantillon à mesurer.



*Figure 3.17: Appareil de microtopographie 3D*

La figure 3.17 montre l'appareil de profilométrie. L'outil à analyser est fixé solidement dans l'étau muni de trois vis de serrages et d'une pièce d'ajustement sur le dessus de la platine. La planéité est ajustée par des vis d'ajustement qui bougent de haut en bas dans chacun des axes X et Y. Cet appareil est mû par deux moteurs qui bougent la platine dans chacun des axes. Un faisceau optique lit la différence de hauteur entre une référence établie précédemment et la lecture. En se déplaçant sur la surface à analyser et par de très petits incréments, la cartographie de chaque hauteur lue peut être assemblée et former ainsi une reproduction en 3D de l'extrémité de l'outil. Étant un instrument optique analysant une surface réfléchissante à certains endroits, l'intensité du faisceau optique et la fréquence d'échantillonnage, deux paramètres clés d'analyse, ont varié pendant la durée du projet. Toutefois, une précision adéquate a été conservée durant toute la période du projet. Les outils neufs ont tous été mesurés avant d'effectuer des soudures. Par la suite, les outils ont été mesurés après

chaque soudure effectuée dans la mesure du possible pour les premières soudures. Dépendamment de l'usure observée, la fréquence de mesure entre les soudures a varié pendant les essais d'usure, mais une fréquence raisonnable a été conservée afin d'obtenir un nombre suffisant de points mesurés pour bien suivre l'usure des outils.

### **3.7 Processus d'application d'une équation phénoménologique à l'usure des outils**

Cette section fait état du processus qui a été utilisé pour trouver une équation phénoménologique pour la prédiction de l'usure des outils. Plusieurs itérations ont été nécessaires afin d'arriver à la formulation finale. Comme il a été expliqué précédemment, la formulation de base de l'équation phénoménologique est la version modifiée de la loi d'usure générale d'Archard qui est exploité dans le travail de *K. Fraser* [17]. Pas seulement dans l'ouvrage précédent, mais dans les autres travaux consultés, cette revue de la littérature a fait ressortir les paramètres clés de l'usure qui peuvent être introduits de façon logique dans la formulation mentionnée précédemment. Le processus d'écriture d'une formule finale se précisera lorsque les résultats seront présentés dans le chapitre suivant.

## **CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION**

### **4.1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'ensemble des résultats obtenus au cours du projet de recherche sur la détermination d'un modèle prédictif de l'usure des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage. Les résultats les plus pertinents seront présentés vers la fin et une section de discussion sur ces derniers servira d'analyse afin de pouvoir recentrer le tout vers le sujet principal.

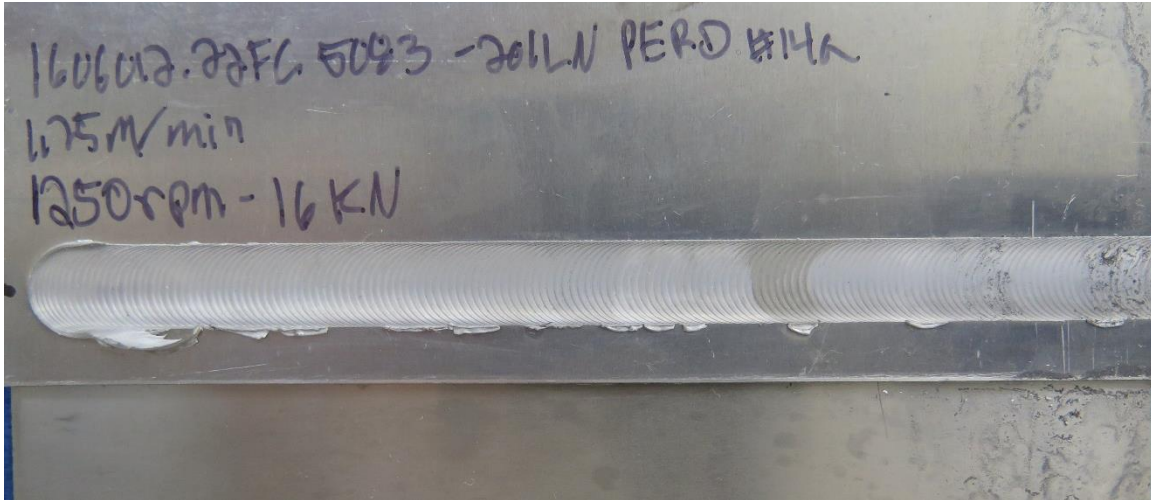
Beaucoup d'information sera donnée selon les sections associées et il est donc important de bien ordonner la séquence de présentation afin de pouvoir rendre une image claire de ce qui a été effectué tout au long de ce projet.

### **4.2 Présentation et analyse des résultats**

Les fenêtres opératoires de chaque couple de matériaux seront présentées en premier. Pour la détermination de ces fenêtres, plusieurs mosaïques de la microstructure des soudures ont été produites, mais non présentées dans ce mémoire dû au volume trop important qu'une présentation adéquate représente. Par la suite, les résultats qui ressortent dans l'analyse des essais mécaniques utilisés pour construire les fenêtres opératoires seront expliqués. Les mesures de températures ainsi que les mesures d'usure suivront. La discussion servira principalement à présenter la formule de prédiction de l'usure.

#### **4.2.1 Les fenêtres opératoires**

Un des sous-objectifs exposés dans l'introduction était de produire des fenêtres opératoires pour chaque couple de matériaux que les membres du groupe de recherche industriel ALTec ont ciblé. Ces couples de matériaux sont présentés dans le tableau 3.4. La méthode de construction de ces fenêtres opératoires a été exposée dans le chapitre 3. Cette méthode commence par la production de soudures produites en contrôle de position comme on peut le voir sur la figure 4.1.



*Figure 4.1: Soudure produite en contrôle de position*

Les tableaux qui présentent les raisons qui ont disqualifiés certaines combinaisons de paramètres opératoires sont tous présentées à l'annexe A dans les tableaux A.1 à A.3. Les tableaux 4.1 à 4.3 présentent les combinaisons de paramètres opératoires qui ont servi pour produire les soudures en contrôle de force à des fins d'analyses.

Tableau 4.1: Paramètres opératoires de soudage par friction malaxage pour le couple de matériau AA5083 SPF/Acier inoxydable 201LN ¼ dur

Identification	Vitesse d'avance (m/min)	Vitesse de rotation (Rot/min)	Pas d'avance (mm/Rot)	Couple (N*m)	Force Verticale (kN)	Énergie spécifique (J/mm)
1	0,3	500	0,6	22,1	12,3	330,8
2	0,3	750	0,4	16,9	12	380,3
3	0,3	1000	0,3	11,9	8	357
4	0,5	600	0,83	11	11	159,8
5	0,6	650	0,92	10,5	10,5	146,3
6	0,75	500	1,5	21,3	17	127,8
7	0,75	750	1	18,3	15	164,7
8	0,75	1000	0,75	15,4	15	184,8
9	0,75	1250	0,6	11,5	11	172,5
10	1	750	1,33	17,5	17,5	118,1
11	1	1000	1	16	16	144
12	1,15	1000	1,15	15	12	117,4
13	1,25	500	2,5	24,2	19	86,9
14	1,25	750	1,67	20	17,5	108
15	1,25	1000	1,25	18,3	18	131,8
16	1,25	1250	1	14	16	126
17	1,25	1500	0,83	10,8	13	116,6

Tableau 4.2: Paramètres opératoires de soudage par friction malaxage pour le couple de matériau AA6082-T6/Acier DP800 Galvanisé

Identification	Vitesse d'avance (m/min)	Vitesse de rotation (Rot/min)	Pas d'avance (mm/Rot)	Couple (N*m)	Force Verticale (kN)	Énergie spécifique (J/mm)
4	0,3	1250	0,24	34,4	8,2	1019,3
5	0,3	1500	0,2	25,2	6	1134
8	0,75	1000	0,75	36,9	13,9	475,2
9	0,75	1250	0,6	36,8	12,4	551,7
10	0,75	1500	0,5	38,9	10,7	699,7
12	1,25	750	1,67	61,4	25	331,6
13	1,25	1000	1,25	45,3	22	325,8
14	1,25	1250	1	40	17,5	360
15	1,25	1500	0,83	37,4	14,5	403,4
16	1,05	1100	0,95	48	14,8	452,6
17	1,4	1300	1,08	50	16	417,9
18	1,25	1150	1,09	49	16	405,7

Tableau 4.3: Paramètres opératoires de soudage par friction malaxage pour le couple de matériau AA6082-T6/AcierA1008

Identification	Vitesse d'avance (m/min)	Vitesse de rotation (Rot/min)	Pas d'avance (mm/Rot)	Couple (N*m)	Force Verticale (kN)	Énergie spécifique (J/mm)
1	0,3	750	0,4	82	7,3	1845
2	0,3	1000	0,3	80	4,8	2400
3	0,3	1250	0,24	43	5,4	1612,5
4	0,3	1500	0,2	37	4,8	1665
5	0,3	1750	0,17	35	4	1837,5
7	0,5	750	0,67	90	6,7	1215
8	0,5	1000	0,5	60	8,4	1080
9	0,5	1250	0,4	46	7	1035
10	0,5	1500	0,33	40	5,6	1080
11	0,5	1750	0,29	36	5,5	1134
12	0,5	2000	0,25	35	4,9	1260
13	0,75	750	1	78	9	702
14	0,75	1000	0,75	66	7	792
15	0,75	1250	0,6	48	7	720
16	0,75	1500	0,5	43	7,5	774
17	0,75	1750	0,43	36	5,6	756
19	1	750	1,33	89	4,8	600,8
20	1	1000	1	67	12,5	603
21	1	1250	0,8	50	8,2	562,5
22	1	1500	0,67	40	8	540
23	1	1750	0,57	39	7,2	614,3
24	1	2000	0,5	38	7	684
25	1,25	750	1,67	87	5,5	469,8
26	1,25	1000	1,25	68	14	489,6
27	1,25	1250	1	56	10,6	504
28	1,25	1500	0,83	44	10,2	475,2
29	1,25	1750	0,71	40	8,2	504
30	1,25	2000	0,63	38	7,3	547,2

Le contrôle en force donne des propriétés constantes aux soudures. Pendant celles-ci, le système d'acquisition de données a enregistré plusieurs paramètres physiques en fonction de la distance parcourue de la tête de soudage. Le couple et la force verticale exercée par l'outil de soudage sont présentés dans les tableaux précédents. L'énergie spécifique indiquée dans la dernière colonne des tableaux précédents est le résultat du calcul de l'équation 2.1. Toutefois, les forces latérales sur

l'outil ont été enregistrées et présentées à l'annexe B aux tableaux B.1 à B.4. Pour évaluer si ces combinaisons de paramètres peuvent être effectuées dans une application robotisée, les forces latérales sont essentielles à connaître. En effet, les bras robotisés ont des limitations physiques au fur et à mesure que leur portée augmente dans leur enveloppe de fonctionnement. La figure 4.2 en donne un exemple.

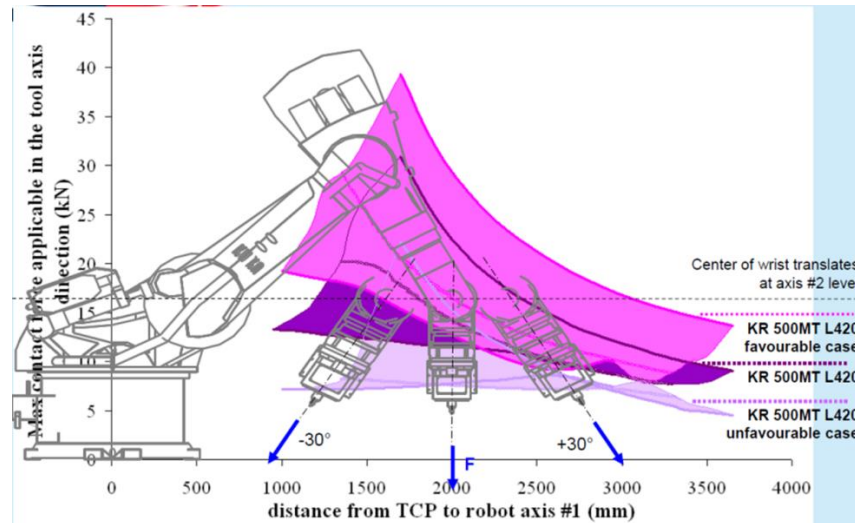


Figure 4.2: Exemple d'une enveloppe de fonctionnement d'un bras robotisé en fonction de la distance de sa base et des angles de travail

Le pas d'avance représente la distance parcourue pour une révolution. Ce paramètre est utilisé dans le calcul de l'énergie spécifique à l'aide de l'équation 2.1. L'énergie spécifique est utilisée pour quantifier de façon approximative, à l'aide des paramètres opératoires, la quantité d'énergie qu'une combinaison de paramètres injecte dans la soudure pour un millimètre d'avance. Ainsi, la température ne peut être déterminée de façon exacte, mais l'énergie spécifique indique si une combinaison de paramètres produira une soudure plus chaude par rapport à une autre combinaison de paramètres ce qui nous donne une bonne idée de la quantité de chaleur introduite dans la soudure. Cependant, les mesures de température, même prises dans l'outil et non à l'interface, sont plus précises que les mesures d'énergie spécifique pour quantifier l'apport de chaleur. Les résultats des essais de traction sont disponibles aux tableaux A.1 à A.3 seulement pour les combinaisons de paramètres opératoires qui ont servies à produire les soudures effectuées en contrôle de force.



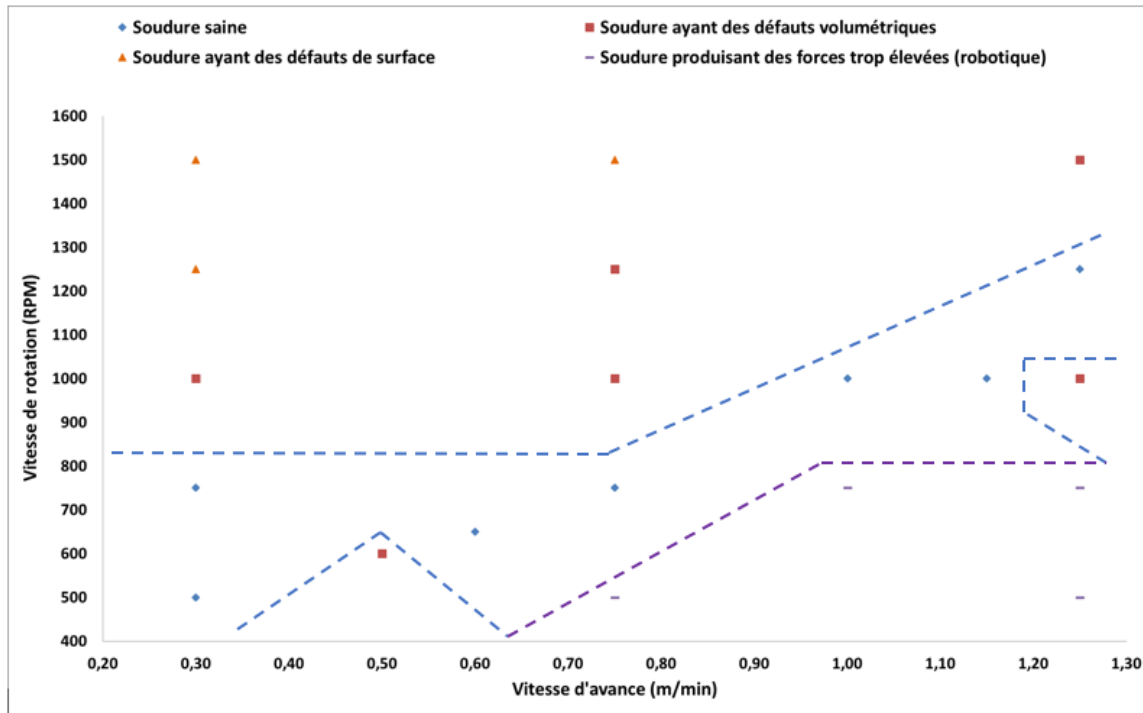


Figure 4.3: Fenêtre des paramètres opératoires (AA5083 SPF 1.7mm Ép. /Acier inoxydable 201LN ¼ dur 2.3 mm Ép.) en recouvrement – outil WC-Co

La figure 4.3 présente la fenêtre opératoire pour le couple de matériaux AA5083 SPF et l'acier inoxydable 201LN ¼ dur. Les points se retrouvant à l'intérieur de la section circonscrite par les lignes pointillées indiquent les combinaisons de paramètres opératoires donnant des soudures saines. Ce graphique présente aussi les combinaisons de paramètres qui génèrent de trop grandes forces latérales pour l'éventualité d'une application robotique visée, soit avec une limite approximative en force latérale statué à  $\approx 2.5\text{kN}$ . On peut remarquer que la partie haute du graphique ne donne pas beaucoup de combinaison de paramètres donnant une soudure saine. L'énergie spécifique créée par ces combinaisons est trop élevée ce qui influence la température maximale atteinte et occasionne différents défauts comme une remontée d'interface trop importante, des défauts de surface ou en sous-surface ou encore une présence élevée de fragments d'acier dans la feuille d'aluminium.



Figure 4.4: Mosaïque de la microstructure de la soudure AA5083 SPF/SS201LN à 50x, 1,25 m/min, 1500 RPM, 13 kN

La figure 4.4 montre la mosaïque de la microstructure de la soudure des matériaux d'assemblage AA5083 SPF/acier inoxydable 201LN ¼ dur. Cette figure est le résultat d'une soudure produite avec comme paramètres opératoires 1,25 m/min, 1500 RPM et 13 kN de force verticale. Cette soudure est un exemple des soudures qui ont été rejetées pour des défauts volumétriques. En effet, un trou de verre a été constaté sur le côté avance de la soudure.

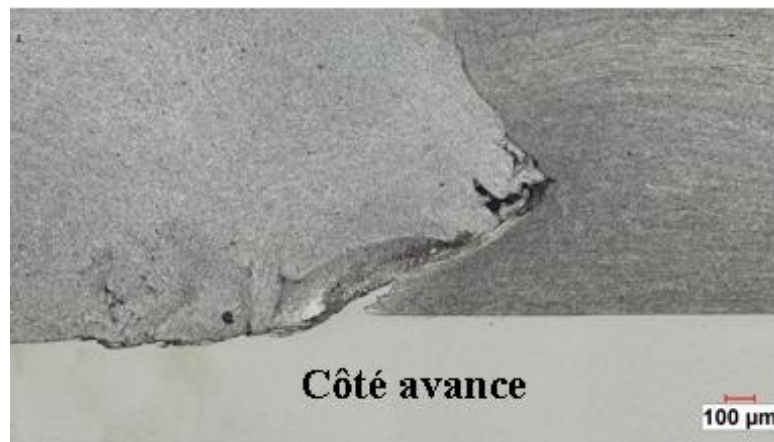
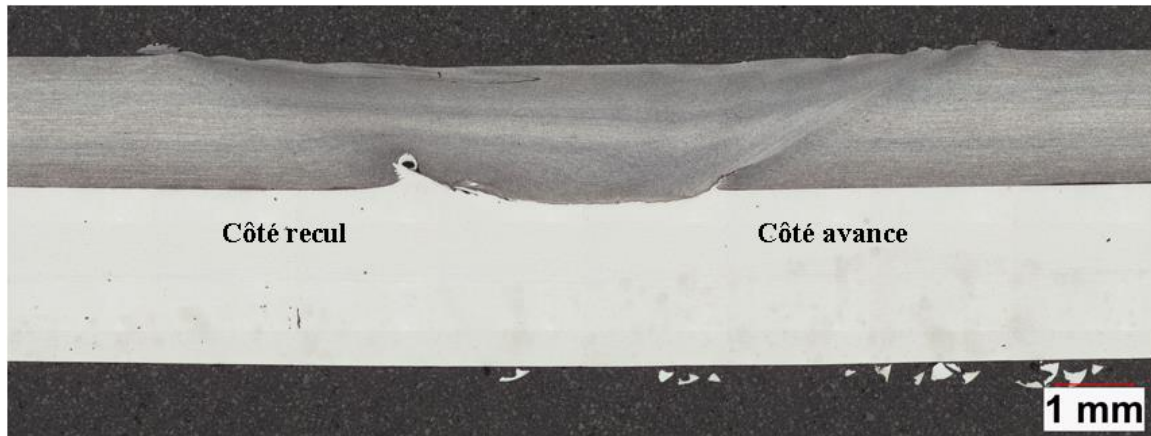


Figure 4.5: Agrandissement à 100x du côté avance de la soudure de la figure 4.4

La figure 4.5 montre un agrandissement de l'interface de la soudure montrée à la figure 4.4. Par le biais de cette figure, on peut voir la disposition typique d'une soudure en recouvrement aluminium et acier. Le côté recul est caractérisé par une remontée et des fragments d'acier. Le côté avance de la soudure est plus chaud que le côté recul de la soudure [42] et une modification de la microstructure de l'aluminium s'y produit juste au-dessus du détachement de l'acier à l'interface. Les soudures n'ayant pas de défaut de surface et ayant minimalement peu de défauts volumétriques

ont été retenues. C'est le cas de la soudure produite avec les paramètres opératoires suivants : 0,75 m/min; 750 RPM; 15 kN. La figure 4.6 montre sa microstructure.



*Figure 4.6: Mosaïque de la microstructure d'une soudure AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur à 50x, 0,75 m/min, 750 RPM et 15 kN*

Le côté recul montre un trou de verre bien défini tandis que le côté avance montre une initiation de fissure qui semble séparer la ZATM et la ZAT. Cette fissure va influencer la résistance en fatigue de la soudure. Bien que celle-ci possède des défauts mineurs, elle a une bonne résistance à la traction comme le tableau 4.4 peut en témoigner. Un élément important à considérer est la profondeur du pion dans l'acier. Tout dépend de l'épaisseur de la feuille d'aluminium et la longueur du pion. Cependant, la profondeur de plongée dans la feuille d'acier est ajustée pour maintenir entre 0,3 et 0,6 mm, juste assez profond pour éviter que le flanc du pion soit en contact avec l'acier.

Tableau 4.4: Résultats des essais de traction simple sur les soudures AA5083 SPF/ Acier inoxydable 201LN ¼ dur

Identification	Épaisseur	Largeur	Vitesse d'avance	Vitesse de rotation	Charge maximale	Contrainte maximale	Charge/Largeur
	mm	mm	m/min	RPM	N	MPa	N/mm
1	1,75	25,65	0,30	500	12463	277,1	485,9
2	1,74	25,90	0,30	750	11448	254,6	442,0
3	1,73	25,91	0,30	1000	10503	234,8	405,4
6	1,73	25,95	0,75	500	12233	272,1	471,4
7	1,73	25,82	0,75	750	12601	282,7	488,0
8	1,73	25,96	0,75	1000	11187	249,1	430,9
9	1,73	25,71	0,75	1250	10697	240,6	416,1
11	1,73	25,93	1,25	500	12302	274,8	474,4
12	1,75	25,55	1,25	750	12802	286,3	501,1
13	1,74	26,42	1,25	1000	12160	264,5	460,3
14	1,75	25,84	1,25	1250	12261	271,1	474,5
15	1,75	25,72	1,25	1500	11073	245,9	430,5
16	1,74	25,70	1,00	750	12569	281,6	489,1
17	1,75	25,47	1,00	1000	11732	263,2	460,6
18	1,74	25,82	1,15	1000	11754	261,5	455,2
19	1,74	25,75	0,60	650	12579	280,8	488,5
20	1,74	25,28	0,50	600	12433	282,7	491,8
	Combinaison de paramètres générant trop de forces (couple, forces transversales)				Combinaison de paramètres générant des défauts		

\*\*Les cases sans couleur représentent des soudures saines et n'excédant pas les forces admissibles

Le tableau 4.4 présente les résultats des essais de traction simple effectués sur les soudures produites avec le couple de matériaux utilisant le AA5083 SPF en tôle supérieure. La charge maximale indiquée dans ce tableau indique la force axiale maximale que l'échantillon a pu supporter avant la rupture. Les lignes en rouge montrent les combinaisons de paramètres opératoires qui n'ont pas été retenues pour construire la fenêtre opératoire de la figure 4.2. Un paramètre intéressant à analyser est la charge soutenue par la soudure divisée par la largeur de l'échantillon. Ce paramètre indique la quantité de charges en newton que la soudure peut soutenir par millimètre de soudure, la largeur de la soudure indiquée dans le tableau 4.4. Certaines de ces combinaisons indiquent des valeurs très élevées de charge/largeur, mais ont été exclues de la fenêtre opératoire admissible. Il est possible que les soudures exclues possèdent de bonnes propriétés mécaniques statiques même en possédant des défauts, car pour des défauts de faible amplitude, il est possible que la rupture statique se produise tout de même dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Cependant, en fatigue, ces défauts de faible amplitude auront une influence importante à la

baisse sur la résistance. Un autre facteur à considérer est la position de ces défauts par rapport à la mise en charge de ces soudures. En effet, la ligne de contrainte dans la soudure peut emprunter un chemin préférentiel qui ne passe pas par ces défauts et qui n'affecte pas la résistance de la soudure lors de l'essai de traction statique.

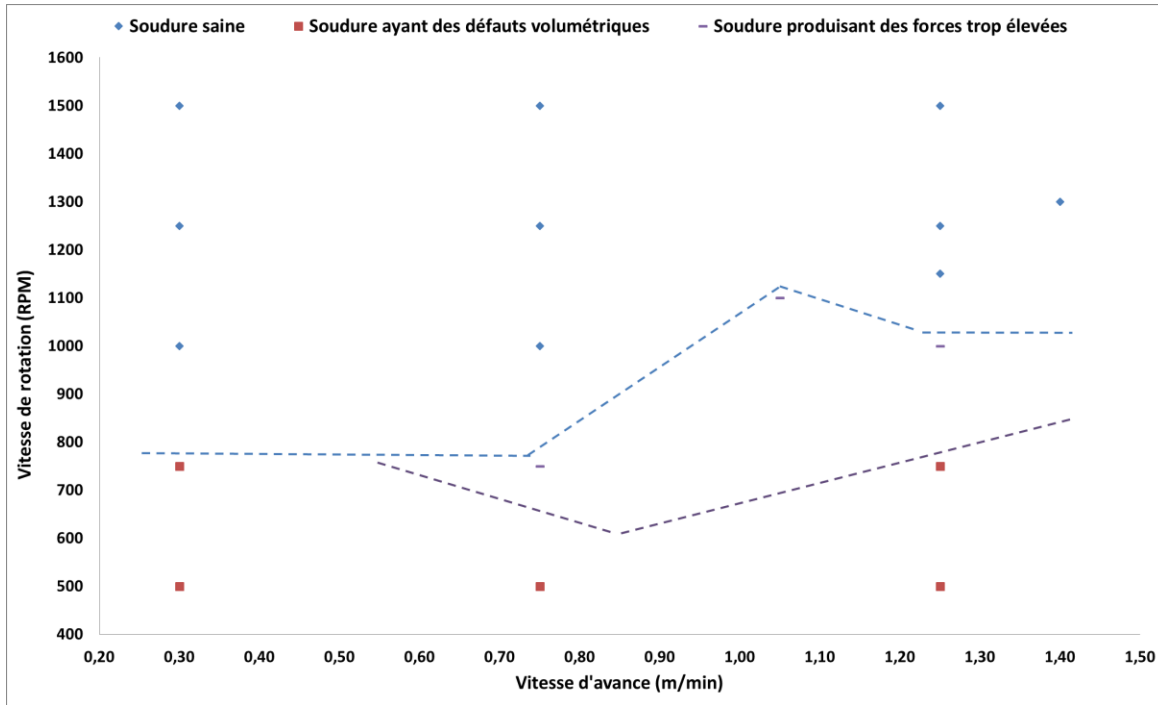
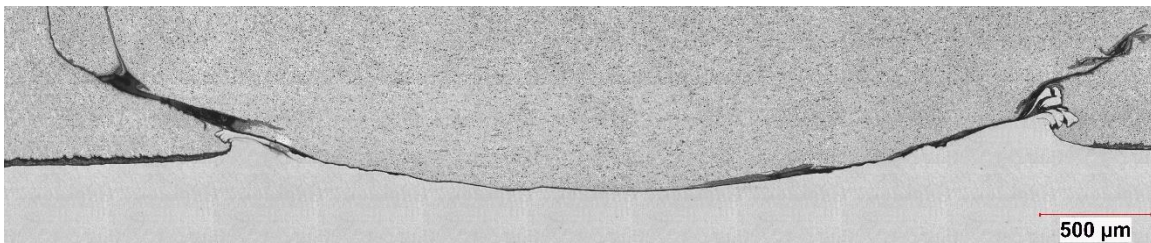


Figure 4.7: Fenêtre des paramètres opératoires (AA6082-T6 1.6mm ép. / DP800 galvanisé 2.0mm ép.) en recouvrement – outil en WC-Co

La figure 4.7 montre la fenêtre opératoire pour le couple de matériaux d'assemblage AA6082-T6 et l'acier DP800 galvanisé. On peut remarquer que l'enveloppe de la fenêtre opératoire de la figure 4.7 est moins restreinte que le couple de matériaux précédent. Cette observation provient du fait que les remontées d'interface sont typiquement plus faibles pour les mêmes paramètres de procédé pour les soudures avec l'acier DP800 galvanisé que pour l'acier inoxydable 201LN ¼ dur. La matrice étant plus dure, il y a plus de matériel déplacé à l'interface que pour l'acier inoxydable 201LN ¼ dur. En regardant attentivement les soudures, on remarque que la présence de défauts volumétriques est généralement favorisée par une remontée d'interface élevée. De plus, il semble y avoir une certaine limite minimale de vitesse de rotation afin d'éviter des défauts volumétriques

dans la soudure. Cette limite est interrompue par la zone des combinaisons de paramètres qui génèrent de trop grandes forces longitudinales pour une application robotique. L'acier DP800 utilisé dans le cadre de ce projet est galvanisé ce qui veut dire qu'une mince couche protectrice de zinc recouvre la surface de l'acier. En produisant les soudures, la couche de zinc est généralement dispersée uniformément dans l'aluminium et peut provoquer des défauts volumétriques à l'interface, car le zinc possède une solubilité maximale à l'état solide de 66.4% dans l'aluminium [43]. Il existe parfois une mince couche de zinc résiduelle à l'interface post-soudage, principalement lorsque les conditions de soudage sont plus froides. La couche de zinc peut aussi être déplacée de l'interface vers les côtés (avance et retrait) dû au mouvement rotatif de l'outil qui cisaille le matériel.



*Figure 4.8: Mosaïque de la microstructure d'une soudure ayant de l'acier galvanisé visualisée à 200x à 0,3 m/min; 750 RPM; 10,2 kN*

La figure 4.8 illustre l'interface d'une soudure où une couche résiduelle de zinc post-soudage est visible. Cette dernière apparaît comme une fine couche noire entre l'aluminium et l'acier le long de l'interface. Le tableau 4.5 présente les résultats numériques des essais de traction pour les soudures effectuées avec le AA6082-T6 et l'acier galvanisé DP800. Comparativement aux autres combinaisons de matériaux étudiées dans ce mémoire, on peut remarquer que peu de combinaisons de paramètres ont été acceptables lors des soudures effectuées en contrôle de position pour qu'elles puissent être reproduites en contrôle de force. Cette remarque peut indiquer que cette combinaison de matériaux est sensible à la profondeur de l'outil et que la couche de zinc influence grandement le résultat des soudures. D'un autre côté, les combinaisons de paramètres qui ont été sélectionnées

pour les soudures en contrôle de force ont, pour la majorité, donné de bons résultats pour la résistance mécanique.

Tableau 4.5: Résultats des essais de traction simple sur les soudures AA6082-T6/Acier DP800 galvanisé

Identification	Largeur	Épaisseur	Vitesse de rotation	Vitesse d'avance	Charge maximale	Contrainte maximale	Charge/Largeur
	mm	mm	RPM	m/min	N	MPa	N/mm
4	25,57	1,52	1250	0,30	8172	211,1	320,2
5	25,56	1,55	1500	0,30	7904	200,1	309,8
8	25,42	1,52	1000	0,75	9383	242,9	369,2
9	24,80	1,55	1250	0,75	9290	241,7	374,7
10	25,11	1,55	1500	0,75	7711	198,0	306,9
12	25,18	1,54	750	1,25	5670	145,7	225,2
13	25,22	1,52	1000	1,25	9323	244,3	370,4
14	25,14	1,56	1250	1,25	9671	247,2	384,7
15	25,61	1,55	1500	1,25	9845	247,6	384,6
16	24,42	1,51	1100	1,05	7588	205,7	311,1
17	25,12	1,54	1300	1,40	7572	196,1	301,4
18	24,45	1,52	1150	1,25	7186	194,1	294,1

Combinaison de paramètres  
générant trop de forces  
(couple, forces transversales)

Combinaison de paramètres  
générant des défauts

\*\*Les cases sans couleur représentent des soudures saines et n'excédant pas les forces admissibles

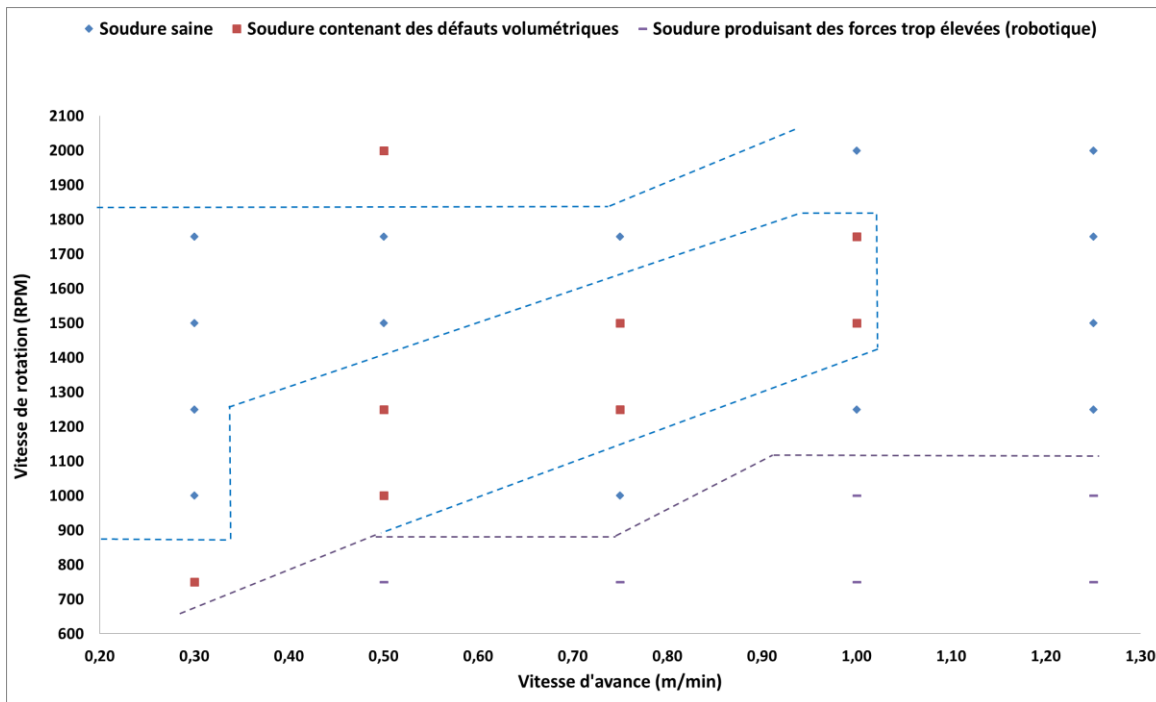
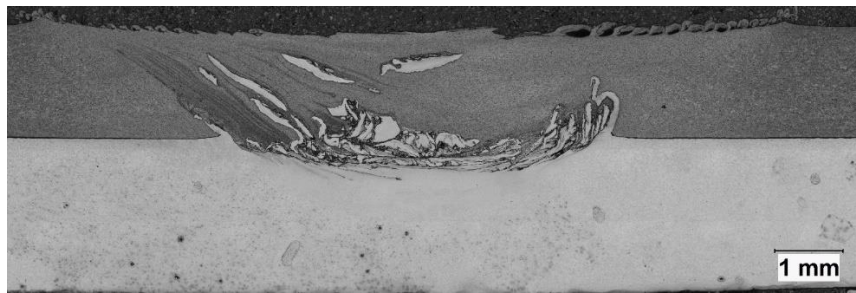


Figure 4.9: Fenêtre des paramètres opératoires (AA6082-T6 1.6mm ép. /Acier A1008 2.2mm ép.) en recouvrement – outil en WC-Co



La figure 4.9 présente la fenêtre opératoire pour le couple de matériaux d'assemblage AA6082-T6 et l'acier standard A1008. On peut noter une zone au centre qui génère des défauts volumétriques. En considérant les propriétés mécaniques de l'acier A1008 présentées au tableau 3.3, la rotation de l'outil provoque beaucoup de morcellement de l'acier dans l'aluminium ce qui génère davantage de sites d'initiation de défauts et des remontés d'interface importante étant donné la dureté très faible de l'acier (présence de grains complètement ferritiques). Avec une vitesse de rotation élevée, ce phénomène peut devenir problématique.



*Figure 4.10: Coupe transversale d'une soudure utilisant l'acier A1008 ayant une vitesse de rotation élevée*

Ce morcellement important dans la zone malaxée, illustrée à la figure 4.10 peut toutefois aider à la résistance statique de la soudure en produisant davantage d'ancrage mécanique tout en ne nuisant pas à l'épaisseur effective de l'aluminium qui reprend les charges. Comme pour les autres fenêtres opératoires précédentes, le tableau 4.6 présente la résistance statique des soudures pour le couple de matériaux contenant l'acier bas carbone A1008:



Tableau 4.6: Résultats des essais de traction simple sur les soudures AA6082-T6/A1008

Identification	Largeur	Épaisseur	Vitesse de rotation	Vitesse d'avance	Charge maximale	Contrainte maximale	Charge/Largeur
	mm	mm	RPM	m/min	N	MPa	N/mm
1	25,81	1,48	750	0,30	7578	198,4	293,6
2	25,93	1,49	1000	0,30	7467	193,9	288,9
3	26,07	1,51	1250	0,30	6005	152,7	230,5
4	23,81	1,50	1500	0,30	6224	174,3	261,4
5	25,93	1,50	1750	0,30	5376	138,2	207,4
7	24,87	1,50	750	0,50	7879	211,9	316,8
8	23,71	1,49	1000	0,50	7363	209,1	310,5
9	24,23	1,50	1250	0,50	6038	166,7	249,3
10	24,18	1,50	1500	0,50	7171	197,9	296,8
11	26,12	1,51	1750	0,50	7999	202,9	306,4
12	23,20	1,50	2000	0,50	5223	149,8	224,7
13	24,57	1,49	750	0,75	3767	102,8	153,2
14	25,16	1,49	1000	0,75	3935	105,2	156,7
15	24,63	1,50	1250	0,75	8018	217,1	325,6
16	24,82	1,48	1500	0,75	7590	206,7	305,9
17	23,80	1,50	1750	0,75	7416	208,5	311,7
19	25,31	1,48	750	1,00	7404	197,6	292,5
20	24,51	1,50	1000	1,00	4637	126,6	189,2
21	23,66	1,49	1250	1,00	8037	228,0	339,7
22	24,73	1,48	1500	1,00	8049	219,7	325,2
23	25,39	1,51	1750	1,00	6729	176,1	265,1
24	25,44	1,48	2000	1,00	8273	219,7	325,0
25	27,29	1,50	750	1,25	7615	186,5	279,7
26	24,40	1,51	1000	1,25	7066	191,9	289,7
27	24,59	1,50	1250	1,25	8389	228,4	341,3
28	24,36	1,49	1500	1,25	4243	117,0	172,3
29	24,89	1,50	1750	1,25	6311	169,4	254,5
30	24,23	1,51	2000	1,25	6875	188,6	283,9
	Combinaison de paramètres générant trop de forces (couple, forces transversales)				Combinaison de paramètres générant des défauts		

**\*\***Les cases sans couleur représentent des soudures saines et n'excédant pas les forces admissibles

Pour une meilleure compréhension de la méthode de détermination des fenêtres opératoires, il est important d'apporter quelques précisions. Les lignes de différentes couleurs dans les figures 4.2, 4.6 et 4.8 délimitent les fenêtres opératoires. Cette délimitation est obtenue en plaçant les traits aux limites des combinaisons de paramètres qui sont écartées par le processus d'analyse des soudures. En réalité, ces fenêtres opératoires n'ont pas de limites clairement définies comme il est illustré dans les figures mentionnées, mais appartiennent à une zone propice à la production de soudures saines. En regardant, par exemple la figure 4.8, on peut remarquer que la fenêtre opératoire a une

forme erratique. En regroupant les combinaisons de paramètres de cette manière, il était plus facile de voir les zones à écarter. En identifiant les combinaisons de paramètres donnant un résultat semblable au niveau qualitatif, il a été possible de délimiter ces regroupements et ainsi, produire les figures qui ont été présentées. Une fois la liste des combinaisons de paramètres opératoires obtenue pour chaque couple de matériaux, il est primordial de sélectionner une combinaison de paramètres qui servira pour les essais d'usure. Deux critères ont été établis pour la sélection : une température stable en régime permanent de soudage et la présence de la combinaison dans la plage de paramètres opératoires optimale. Dans le but de tester les outils à l'usure dans un cadre le plus réaliste possible, il fallait sélectionner les combinaisons en fonction de leur probabilité à être utilisée en production. Ainsi, les combinaisons de paramètres retenus sont les suivantes par couple de matériaux :

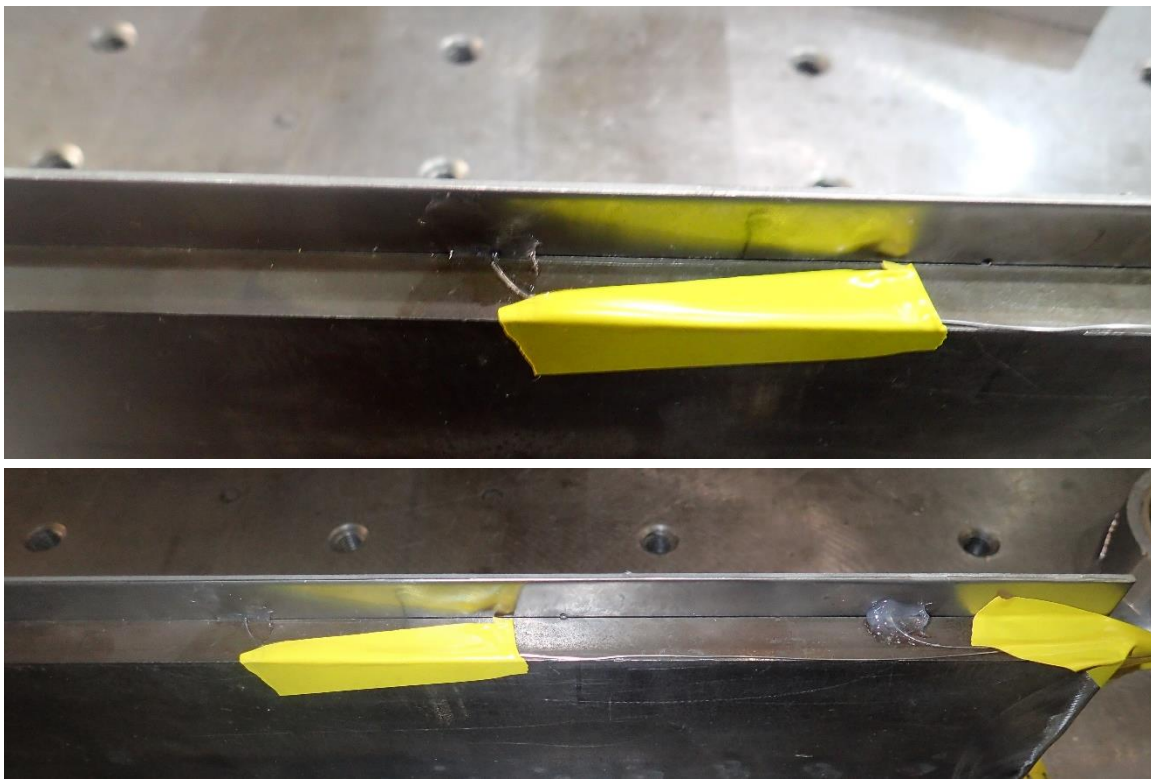
- AA6082-T6/Acier DP800 galvanisé : 1250 RPM; 1,25 m/min @ 18 kN;
- AA6082-T6/Acier A1008 : 2000 RPM; 1,00 m/min @ 6,5 kN;
- AA5083 SPF/Acier inoxydable 201LN ¼ dur :
  - 750 RPM; 0,75 m/min @ 16 kN;
  - 1250 RPM; 1,25 m/min @ 17 kN.

La force normale est le résultat de l'optimisation des paramètres faite en amont lors de la production des fenêtres opératoires. Comme mentionné précédemment, ces forces peuvent varier un peu tout en donnant le même résultat au niveau de la soudure. Étant donné que celles-ci entrent dans la formulation présentée dans ce chapitre, elles peuvent avoir un impact significatif sur le taux d'usure obtenu. La combinaison de paramètres offrant l'usure la plus élevée est utilisée pour calibrer la formulation.

#### **4.2.2 Les mesures de températures**

Il est très difficile de mesurer la température à l'interface. Une mesure directe implique un thermocouple qui possède une certaine inertie thermique occasionnée par sa taille et influence le

temps de réponse de ce thermocouple, plus le thermocouple a un gros diamètre, plus le temps de réponse sera élevé. Des essais ont été réalisés pour pouvoir mesurer la température par le bas de la soudure. Ces essais ont pris beaucoup de temps et de matériel et ont mené à la conclusion que la méthode employée était totalement inefficace pour plusieurs raisons. La première est que le thermocouple possède une rigidité considérable et ne peut être courbé jusqu'à un certain degré ce qui a rendu son positionnement complexe.



*Figure 4.11: Positionnement des thermocouples pour les mesures de températures à l'interface*

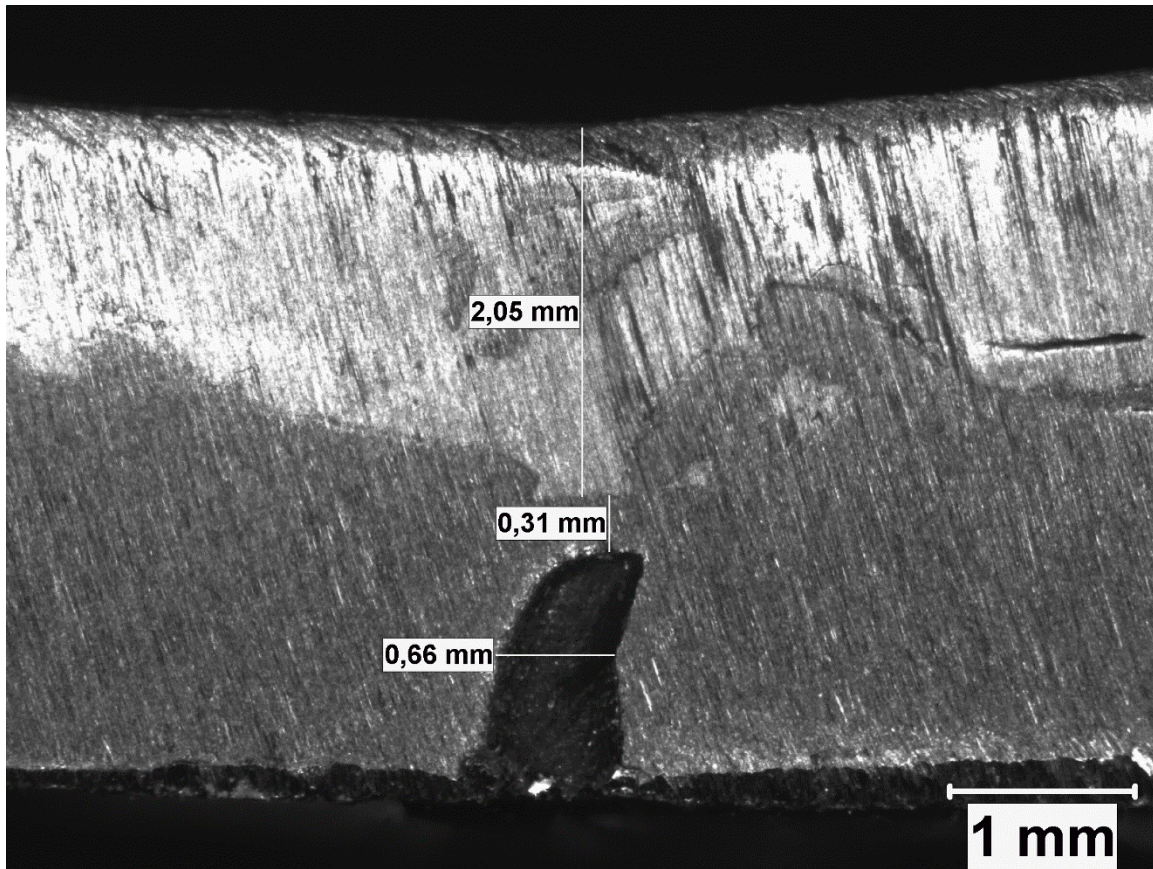
La feuille d'acier de l'assemblage a été fixée solidement sur une des plaques de support en laissant une largeur dépassée. La figure 4.11 montre la vue de dessous de la feuille d'acier avec les thermocouples insérés dans les trous de la méthode expliquée prochainement et fixés sur le côté de la plaque de support. Cette méthode a été de percer de petits trous de 0,6 mm de diamètre à travers la feuille pour y insérer les thermocouples qui ont un diamètre de 0,51 mm. La figure 4.12 montre l'un de ces trous positionnés à la bordure de la plaque de support. Une autre plaque de support de

la même épaisseur était contre les thermocouples en essayant de minimiser l'espace entre les deux plaques. Si cette espace avait été trop grande, elle aurait pu influencer la profondeur de pénétration de l'outil. Le raisonnement était que lorsque l'outil allait passer au-dessus du thermocouple, celui-ci allait baisser légèrement afin de toujours avoir un contact direct entre l'outil et le thermocouple et ainsi, avoir une lecture de la température.



*Figure 4.12: Trou employé pour insérer le thermocouple dans la feuille d'acier*

La méthode employée n'a pas été un succès puisqu'elle n'a pu donner des résultats répétitifs et c'est pourquoi elle ne sera pas présentée en détail. Toutefois, elle peut donner des idées de concept pour la lecture de températures à l'interface alors voici une image d'une coupe transversale des soudures d'essai de lecture de température à l'interface.



*Figure 4.13: Mesures des distances intra-soudure pour les mesures de températures à l'interface*

Elle montre les différentes distances qu'a données un essai de mesures de températures à l'interface. On peut voir que du dessus de la feuille d'aluminium jusqu'à la racine du trou pour le thermocouple, une distance de 2,36 mm les sépare. Cette distance correspond à la longueur du pion et la sous-épaisseur occasionnée par l'outil. Seulement 0,31 mm sépare l'extrémité du thermocouple de l'extrémité de l'outil ce qui peut potentiellement donner de bons résultats. Cependant, 2 thermocouples des 6 essais ont pu donner une valeur. Les autres thermocouples n'ont pas tenu et ont été entraînés dans la soudure.

L'approche adoptée dans ce projet a donc été d'insérer un thermocouple à l'intérieur de l'outil à son centre jusqu'à la hauteur de l'épaule. Bien que les températures soient inférieures à celles obtenues à l'interface, elles seront distinctes en fonction des paramètres de soudage. C'est

la différence de température en fonction des paramètres qui est visée par la présente étude et non la valeur absolue à l'interface.

La figure 3.16 montre l'emplacement du thermocouple dans l'outil. Le détail du système a été présenté au chapitre précédent et sert à approximer la température à l'interface de la soudure. Dans une soudure relativement longue, on peut considérer que la température de l'outil a le temps d'atteindre un régime permanent. Les températures maximales sur des essais répétitifs ont été enregistrées. Généralement, la température maximale est fonction de la vitesse de rotation de l'outil et de la vitesse d'avance. Les figures 4.14 à 4.16 montrent les températures maximales atteintes dans l'outil en fonction de la vitesse de rotation dans les assemblages AA6082-T6 et A1008. On peut remarquer qu'à 2000 RPM, la température à 0,5 m/min est de 540°C et de 515°C à 1,0 m/min. En augmentant la vitesse d'avance de l'outil, l'apport de chaleur, aussi appelé l'énergie spécifique [18], diminue (l'énergie est distribuée dans un plus grand volume) ce qui a pour effet de créer une température maximale inférieure par rapport à une vitesse d'avance plus faible. La figure 4.14 montre les températures maximales atteintes pour une vitesse d'avance de 0,3 m/min. À 2000 RPM, la température est élevée pour une vitesse d'avance faible.

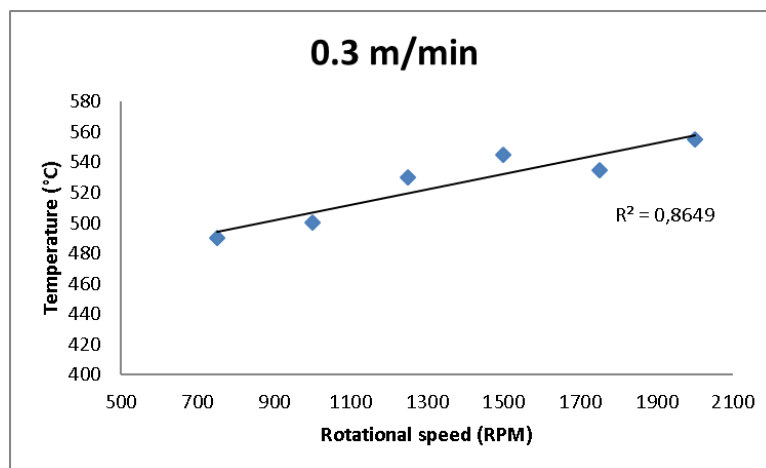


Figure 4.14: Température dans l'outil en fonction de la vitesse de rotation dans un assemblage AA6082-T6/A1008 à 0,3 m/min



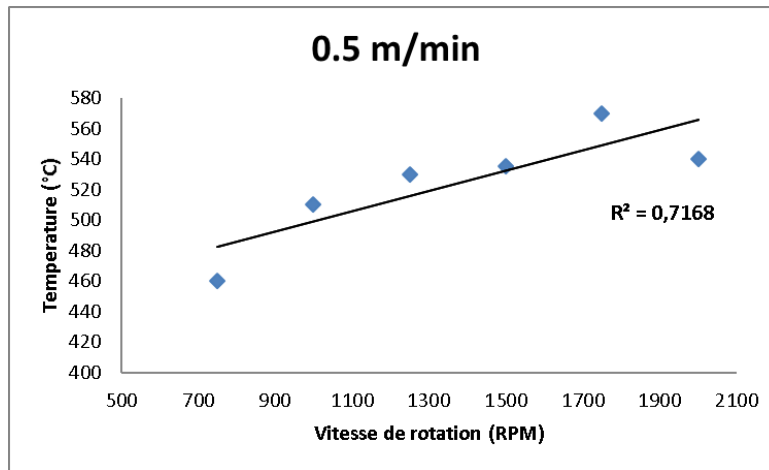


Figure 4.15: Température dans l'outil en fonction de la vitesse de rotation dans un assemblage AA6082-T6/A1008 à 0,5 m/min

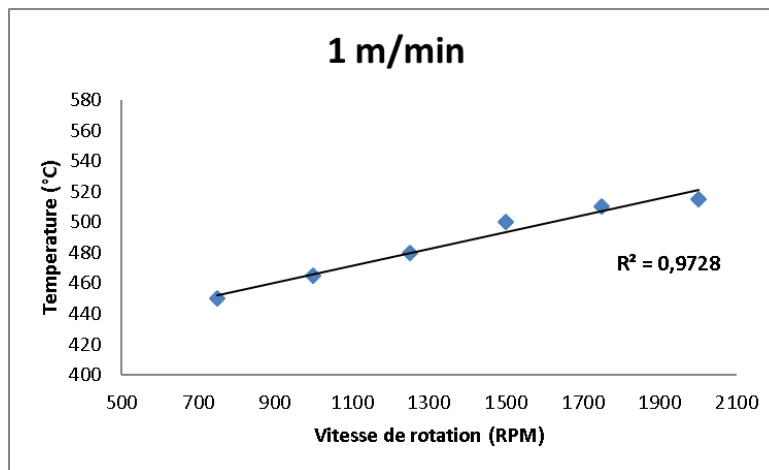


Figure 4.16: Température dans l'outil en fonction de la vitesse de rotation dans un assemblage AA6082-T6/A1008 à 1,0 m/min

Comme il a été mentionné dans le chapitre 2, plusieurs paramètres influencent la température dont le couple de rotation. Aussi, le passage du régime adhérent au régime glissant peut expliquer les différences observées. Toutefois, la compréhension des régimes de glissement n'est pas clairement comprise et aucune référence claire ne permet de statuer sur les effets des différents régimes de glissement. Donc, en l'absence de preuve de ma dernière affirmation, celle-ci va demeurer en hypothèse et ne doit pas être considérée comme une conclusion. L'approche adoptée dans certains ouvrages penche davantage vers une variation du régime glissant et adhérent entre les stries laissées par l'épaulement à la surface de l'assemblage [17].

L'apport de chaleur n'influence pas seulement le comportement des aciers comme présenté précédemment, mais elle influence aussi la résistance de l'outil. Rappelons que l'outil est fabriqué en carbure de tungstène allié au cobalt dans une proportion de 25%. Du chapitre 2, on sait que la résistance globale de cet alliage est consécutive de plusieurs paramètres, mais plus particulièrement de la teneur en cobalt ainsi que de la grosseur des carbures et de l'uniformité de leur distribution. Le carbure de tungstène possède une très bonne stabilité à haute température ce qui le rend apte à garder sa résistance dans des applications où la température est élevée. Le cobalt permet une meilleure absorption des impacts et rend l'alliage plus ductile. La figure 4.17 montre les variations des propriétés mécaniques du WC-Co en fonction du pourcentage de cobalt dans l'alliage. Les courbes A à D correspondent à une teneur en carbure de tungstène (WC) respectivement de 95%, 85%, 75% et 65%.

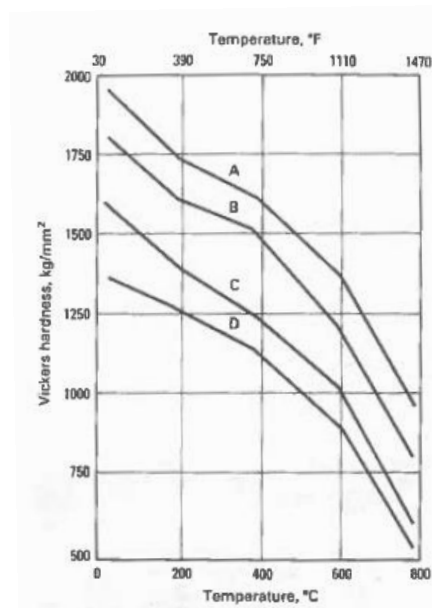


Figure 4.17: Variations de la dureté en fonction de la température pour différents alliages de WC [44]



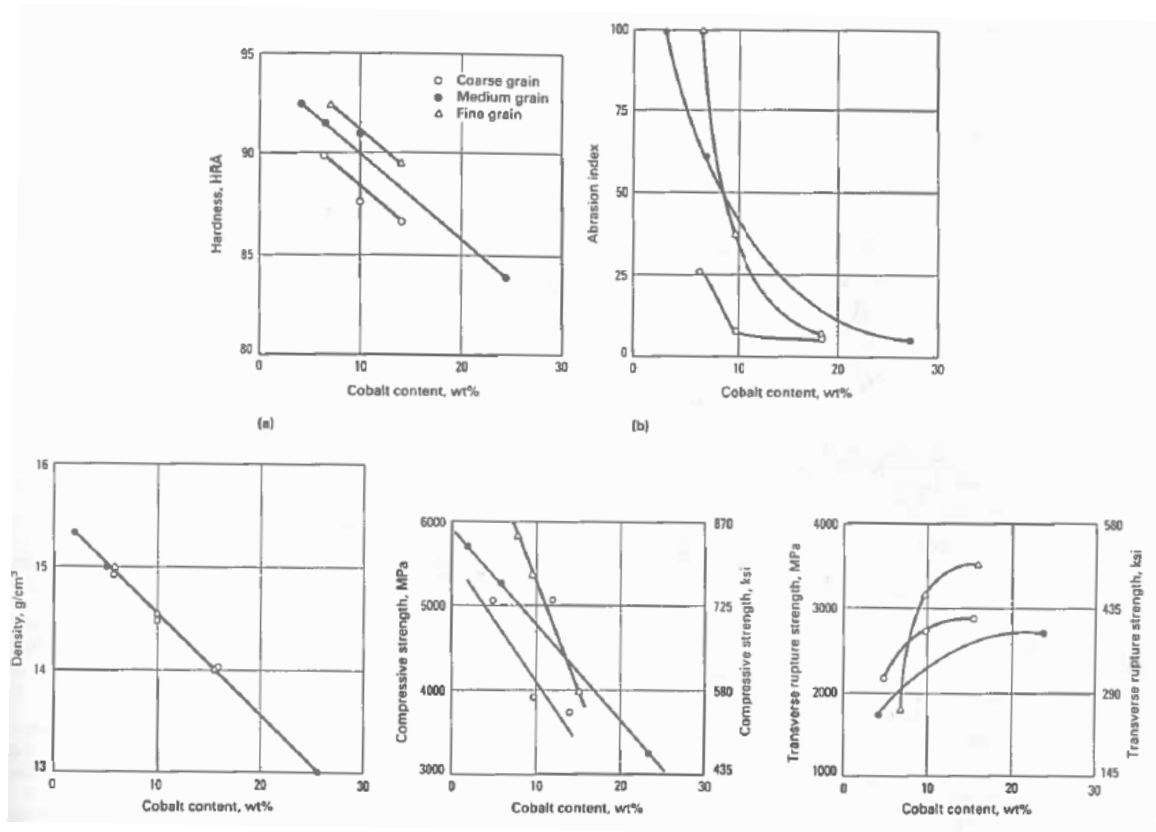


Figure 4.18: Variations des propriétés du WC-Co en fonction de pourcentage de cobalt[44]

La figure 4.18 montre la variation de la dureté en fonction de la température pour différents alliages de WC. Selon ces graphiques, la dureté diminue grandement dans l'intervalle de températures entre 400°C et 600°C (entre 1100 et 900 HV). Cette diminution en dureté a été testée en laboratoire à l'aide d'un appareil de nano-indentation Vickers. Les résultats sont présentés à la figure 3.4 et montrent les différentes valeurs de dureté en fonction de la position sur l'outil. On peut constater que la dureté est relativement constante. La courbe C de la figure 4.17 représente la diminution de dureté Vickers en fonction de la température pour un pourcentage de WC se rapprochant beaucoup du pourcentage de WC que possèdent les outils de ce projet. En comparant les figures 4.17 et 4.18, on peut supposer que la différence de températures entre le centre de l'outil et l'extrémité est relativement faible puisque la variation de dureté entre ces deux positions n'est pas significative. En effet, en associant une dureté à l'atteinte d'une certaine température, il est possible de déduire une valeur de dureté en exploitant les figures mentionnées dernièrement. La température associée

à une combinaison de paramètres opératoires est une température en régime permanent. En mettant les dernières informations en relation, on peut dire que la température lue par le thermocouple est approximativement la température à l'interface de la soudure. En effet, l'épaisseur de matière qui sépare l'extrémité du thermocouple et l'extrémité de l'outil est très faible et la conductivité thermique du matériau de l'outil est bonne. Ce qui veut dire que le transfert de chaleur se fait rapidement.

#### 4.2.3 Divers résultats sur les soudures et les matériaux d'assemblage

Il est maintenant nécessaire de mettre les informations en relation, c'est-à-dire analyser la microstructure des outils et celles des matériaux d'assemblage. Les outils sont composés d'un matériau bi-phasé, des particules très résistantes de carbure de tungstène et une matrice plus ductile de cobalt. Cette microstructure particulière semble se comporter un peu comme du sable sous certaines conditions, lorsque soumise à une sollicitation de type cisaillement, les particules granulaires résistantes se détachent de l'ensemble et restent imbriquées dans le médium qui provoque la sollicitation. C'est exactement ce processus qu'on voulait confirmer en analysant en microscopie électronique à balayage couplé à un détecteur de spectroscopie à rayons-X à dispersion d'énergie quelques échantillons soudés. Le but de ces analyses était de confirmer qu'il y avait bel et bien une perte de matériel de l'outil dans les soudures et de confirmer que cette perte était présente tout au long de la soudure.

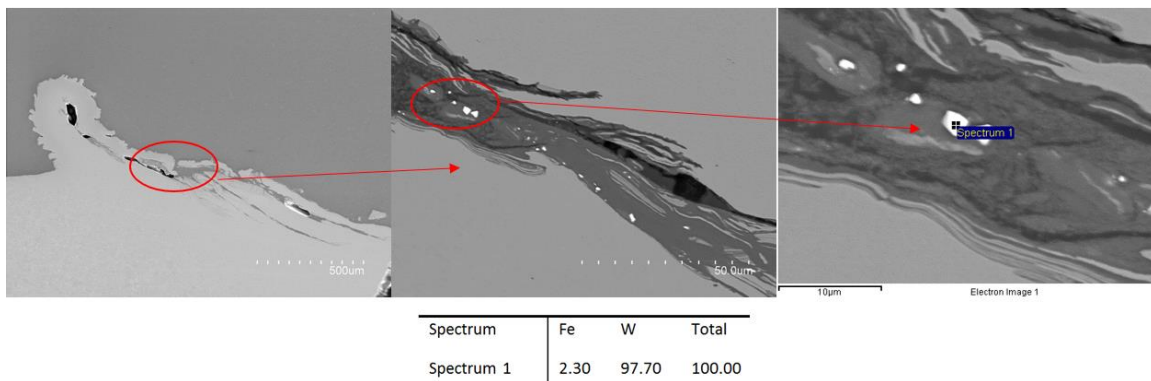


Figure 4.19: Analyse en spectroscopie à rayons-X réalisée au MEB d'un échantillon soudé AA5083 SPF/SS201LN

Comme on peut le voir à la figure 4.19, l'analyse révèle des dépôts de tungstène du côté avance de la soudure. Cette affirmation vient du fait que la composition des matériaux d'assemblage ne possède pas de tungstène comme il a été présenté dans le tableau 3.2. Les autres analyses en spectroscopie à rayons-X au MEB du projet confirment et appuient l'hypothèse que l'usure de l'outil est un phénomène continu au fur et à mesure que la soudure se produit. Le fait que les analyses ont été réalisées sur seulement quelques sections transversales des échantillons et que des particules de WC ont été détectées suggère que la déposition des carbures de tungstène le long des soudures est continue.

Bien que les outils soient composés de carbure de tungstène possédant une dureté très élevée, il est possible que les matériaux d'assemblage possèdent eux aussi des particules relativement résistantes. De plus, l'outil possède une matrice de cobalt qui tient les carbures ce qui limite la résistance des carbures à l'arrachement étant donné que cette matrice est moins résistante. Les aluminiums utilisés dans le cadre du projet possèdent de bonnes propriétés mécaniques, mais pas assez élevées pour justifier une influence aussi importante sur la durée de vie des outils. La dureté des aciers est une combinaison entre les phases dures et les phases molles des aciers. Comme il est mentionné au chapitre 3, la dureté de l'acier bas carbone A1008, qui est monphasé, est d'environ 115 HV. En ce qui concerne l'acier inoxydable 201LN, cette dureté est en moyenne de 287 HV. L'acier galvanisé DP800 possède les phases les plus dures du lot. Une analyse de la dureté des phases de cet acier était donc nécessaire afin de pouvoir comparer la dureté du carbure de tungstène et les phases de martensite retrouvées dans le DP800.

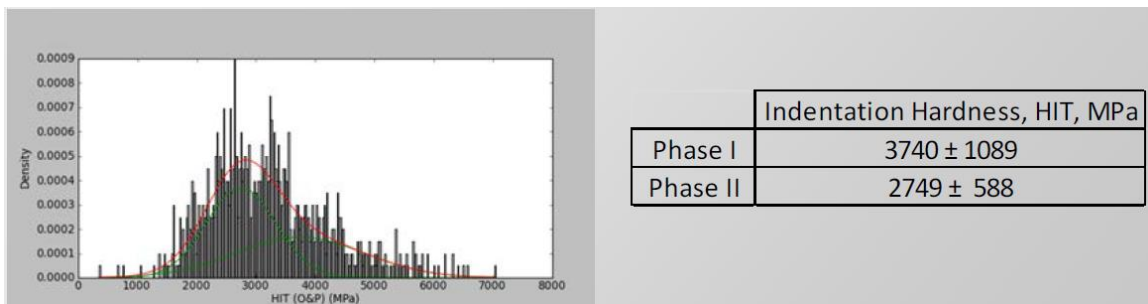


Figure 4.20: Dureté des différentes phases de l'acier galvanisé DP800

La figure 4.20 montre la distribution de dureté des phases de l'acier galvanisé DP800 réalisé par le laboratoire *Anton-Paar* par nano-indentation. La nano-indentation permet d'obtenir une valeur de dureté plus précise au niveau des phases de martensite et de ferrite. Même en ayant un pénétrateur très petit, il est difficile d'obtenir précisément la dureté de la martensite. Le graphique montre une distribution de la dureté en fonction de la densité obtenue. Logiquement, les plus hautes duretés mesurées ont plus de chance de s'approcher de la dureté de la martensite uniquement. Elle se situe donc entre 6200 et 6500 HIT (dureté de pénétration). Suivant la relation suivante de l'équation 4.1[45, 46] :

$$HV = 0,0945HIT \quad (4.1)$$

la dureté de pénétration de la martensite pure peut être transférée en dureté Vickers, une valeur davantage représentative et comparable. Les valeurs se situent entre 586 HV et 614 HV. À la suite de ces résultats, une conclusion intuitive peut être formulée. Les phases dures des matériaux d'assemblage peuvent avoir une influence significative sur la durée de vie de l'outil. Cette conclusion est davantage utilisée comme hypothèse de travail et s'explique phénoménologiquement par l'interaction entre les phases dures des matériaux d'assemblage et la phase ductile de WC-Co. Le schéma suivant représente bien cette interaction:

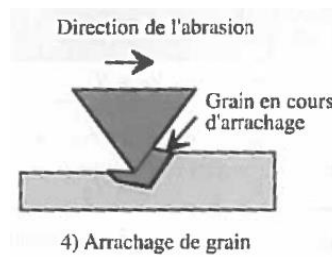


Figure 4.21: Schématisation de l'arrachement de grain à partir de la phase souple de l'outil [47]

La figure 4.21 montre un des modes d'usure par abrasion qui se nomme l'arrachage de grain. Ce mode représente bien comment les phases dures des matériaux d'assemblage peuvent s'incruster dans la phase souple du WC-Co et arracher un carbure au passage et vice versa.

Pour profiter de ces données comme intrant dans la prédiction de l'usure des outils, le comportement des matériaux à ces températures a été pris en compte plus spécifiquement pour les

aciers. La raison est que certains aciers possèdent une propriété qui augmente leur limite ultime en fonction de la vitesse de déformation [48]. Grâce au logiciel *JMatPro*, nous avons pu estimer la limite élastique des aciers en fonction de différentes vitesses de déformation que la rotation de l'outil provoque ainsi que de la température à l'interface de la soudure. Ce logiciel se base sur la composition chimique des matériaux pour estimer certaines propriétés physiques et mécaniques. Bien évidemment, cette température est inconnue, ce qui implique qu'elle a été considérée comme identique à la température de l'outil enregistrée pendant nos essais.

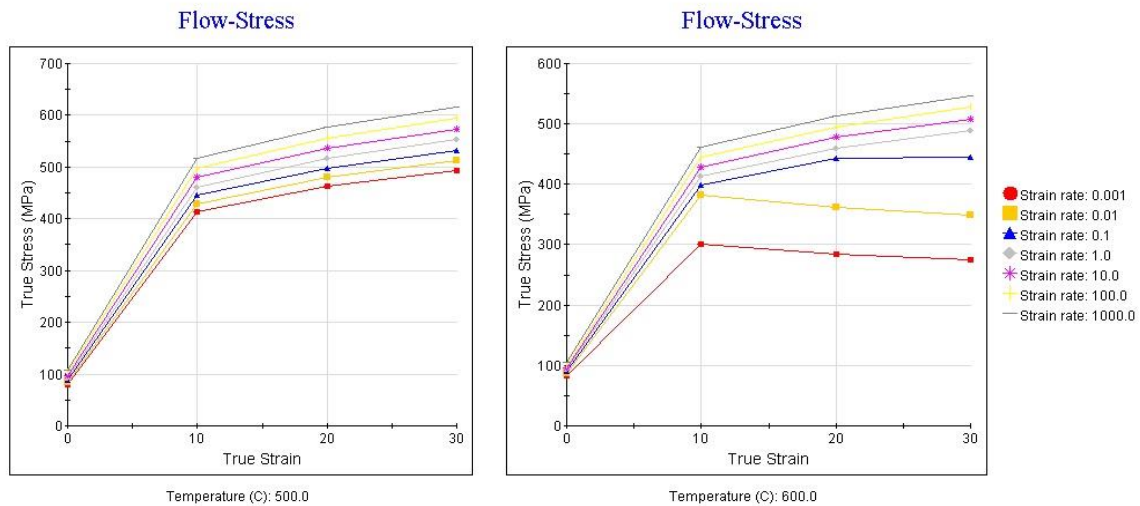


Figure 4.22: Graphique contraintes-déformations de l'acier A1008 en fonction des différentes vitesses de déformation à 500°C et 600°C

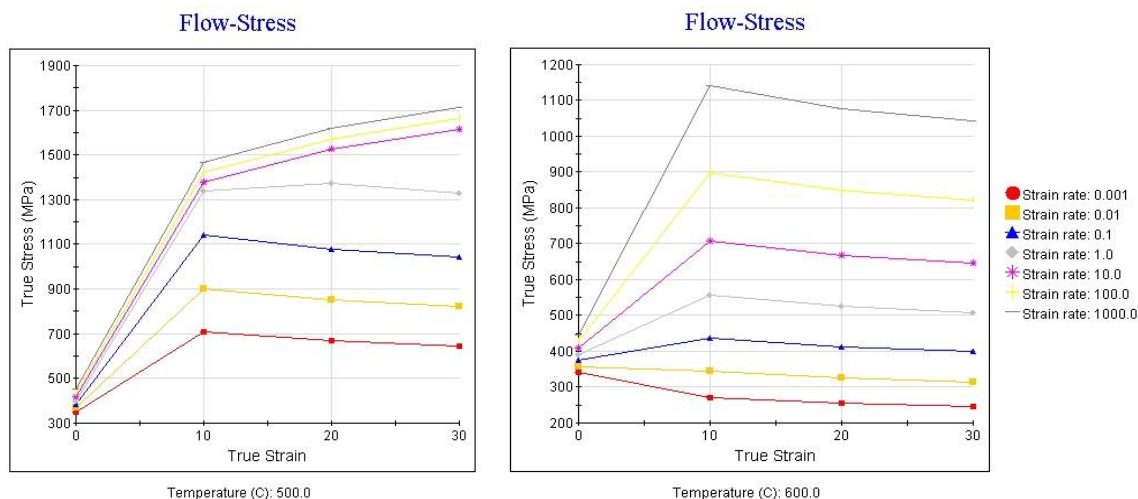


Figure 4.23: Graphique contraintes-déformations de l'acier DP800 en fonction des différentes vitesses de déformation à 500°C et 600°C

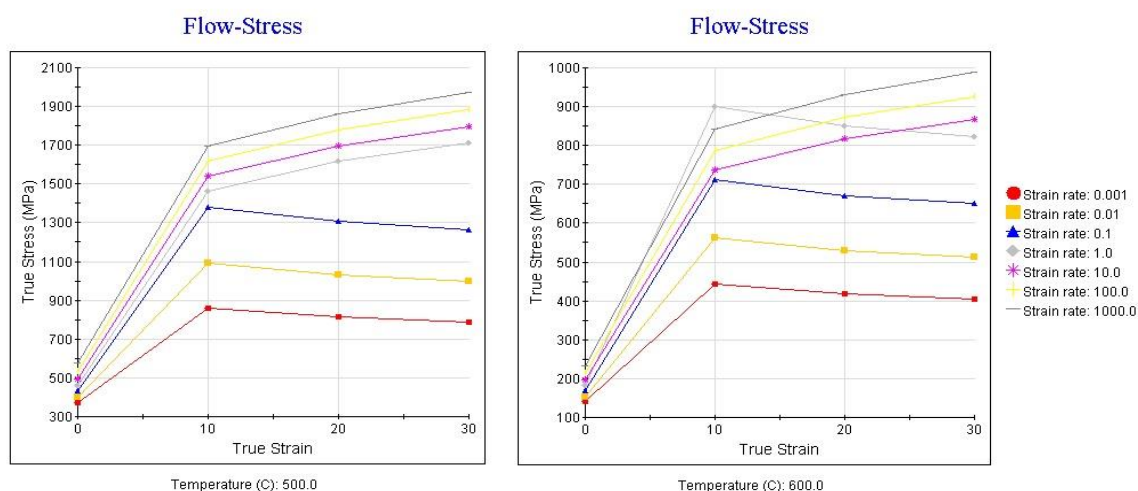


Figure 4.24: Graphique contraintes-déformations de l'acier inoxydable 201LN en fonction des différentes vitesses de déformation à 500°C et 600°C

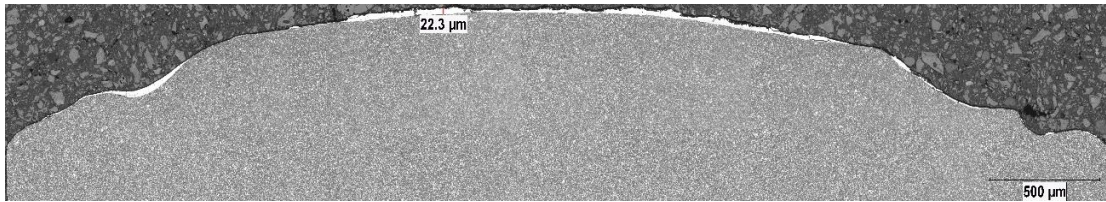
Les figures 4.22 à 4.24 montrent les graphiques de contraintes-déformations en fonction des différentes vitesses de déformation à 500°C et 600°C pour les trois aciers utilisés dans le cadre du projet. Ces graphiques montrent le comportement de ces aciers aux températures se rapprochant des températures atteintes à l'interface des matériaux dans les soudures. Comme mentionné au chapitre 2, les vitesses de déformations retrouvées varient entre  $1\text{s}^{-1}$  et  $100\text{s}^{-1}$  [49]. L'analyse de ces graphiques permet de comprendre le comportement et les particularités de ces aciers. Le point de

départ de chaque courbe est la limite élastique. Ce sont ces valeurs de limites élastiques qui sont employées pour confirmer le changement de propriété mécanique des aciers en fonction de la température et de la vitesse de rotation. Comme l'indique la figure 4.16, la température maximale atteinte, lors des soudures effectuées à 1m/min et à 2000 rpm, est d'environ 500°C. La limite élastique associée à ce cas-ci est normalement de 90 MPa à  $1 \text{ s}^{-1}$  et augmente à 99 MPa à  $100 \text{ s}^{-1}$  de vitesse de déformation pour l'acier A1008. Cette observation peut être faite avec les autres aciers. On remarque que la limite élastique de l'acier DP800 galvanisé est à 375 MPa à  $1 \text{ s}^{-1}$  et augmente à 408 MPa à  $100 \text{ s}^{-1}$  pour une soudure effectuée à 1,25 m/min et à 1250 rpm. En ce qui concerne la limite élastique de l'acier inoxydable 201LN, elle passe de 420 MPa à  $1 \text{ s}^{-1}$  à 489 à  $100 \text{ s}^{-1}$  pour une soudure effectuée à 0,75 m/min et à 750 rpm. Le soudage par friction-malaxage doit générer une déformation permanente des matériaux pour produire une soudure saine. De ce fait, il est primordial d'excéder la limite élastique des matériaux. La matière est souvent déplacée à l'interface plutôt que morcelée pour une soudure saine ce qui fait de la limite élastique un bon moyen de quantifier le travail nécessaire à effectuer dans la soudure pour produire un assemblage sain. Comme il a été mentionné précédemment, les données de la limite élastique des aciers doivent être connues pour les températures atteintes ce qui peut être plus difficile à trouver dans la littérature ou à obtenir expérimentalement. Il est plus convivial d'obtenir ces informations du logiciel *JMatPro* tant que ces données ne sont pas disponibles.

#### **4.2.4 Résultats des essais d'usure**

Cette section est consacrée à la présentation des résultats d'usure. Tout d'abord, il est important de présenter comment l'usure a été mesurée et quels sont les combinaisons de paramètres opératoires qui ont été utilisées pour représenter l'usure dans chaque couple de matériaux d'assemblage. Comme il a été mentionné dans la méthodologie, l'usure des outils a été mesurée grâce à un appareil de microtopographie 3D couplé à un logiciel d'analyse, *Mountain Maps*®.

Au cours des soudures, il a été remarqué que certaines parties de l'outil ne subissaient pas d'usure comparativement à d'autres sections. Étant donné que l'épaulement travaille sur l'aluminium, aucune usure n'a été remarquée ce qui implique que mesurer l'usure jusqu'à l'épaulement est inutile. L'usure se concentre principalement à l'extrémité du pion, la partie de l'outil qui est en contact avec l'acier. La méthode de mesure est importante à sélectionner puisque l'usure adhésive provoque une adhérence de particules d'acier et d'aluminium sur l'extrémité de l'outil. Une évaluation directe du volume du pion serait faussée par l'aluminium et l'acier collé sur l'outil. Un traitement chimique au NaOH 10% v/v permet de dissoudre l'aluminium, mais n'affecte pas l'acier.



*Figure 4.25: Coupe transversale d'un outil en fin de vie*

La figure 4.25 montre une coupe transversale d'un outil utilisé dans le cadre des essais d'usure. Cet outil a été nettoyé de l'aluminium. La couche superficielle blanche à l'extrémité du pion et sur les abords de l'outil est de l'acier collé en cours de soudage. Aucun moyen chimique et mécanique disponible n'a pu dissoudre l'acier sans affecter la microstructure de l'outil. Avec le logiciel d'analyse, certaines portions problématiques de la mesure peuvent être retirées en post-traitement. Comme on peut le voir sur la figure 4.25, l'extrémité du pion a une surface relativement uniforme, ce qui permet de pouvoir enlever virtuellement la surépaisseur de métal et ainsi, effectuer une mesure adéquate. Toutefois, traiter la surface entière par cette méthode donnerait de faux résultats puisqu'il serait inévitable d'enlever de l'outil dû à la surface irrégulière. La hauteur du pion à partir de l'épaulement sert à suivre l'usure étant donné qu'elle est proportionnelle à celle-ci et il est plus simple d'effectuer des opérations de post-traitement sans produire une fausse mesure. L'usure a donc été mesurée par la hauteur du pion à intervalles relativement réguliers, et ce, pour



chaque couple de matériaux. Cette mesure a été choisie puisqu'elle est considérée comme étant la plus représentative de l'usure d'un outil. En effet, bien que la hauteur ne soit pas le seul paramètre qui indique la présence de l'usure, une très faible variation du diamètre du pion a été notée et seulement qu'en fin de vie.

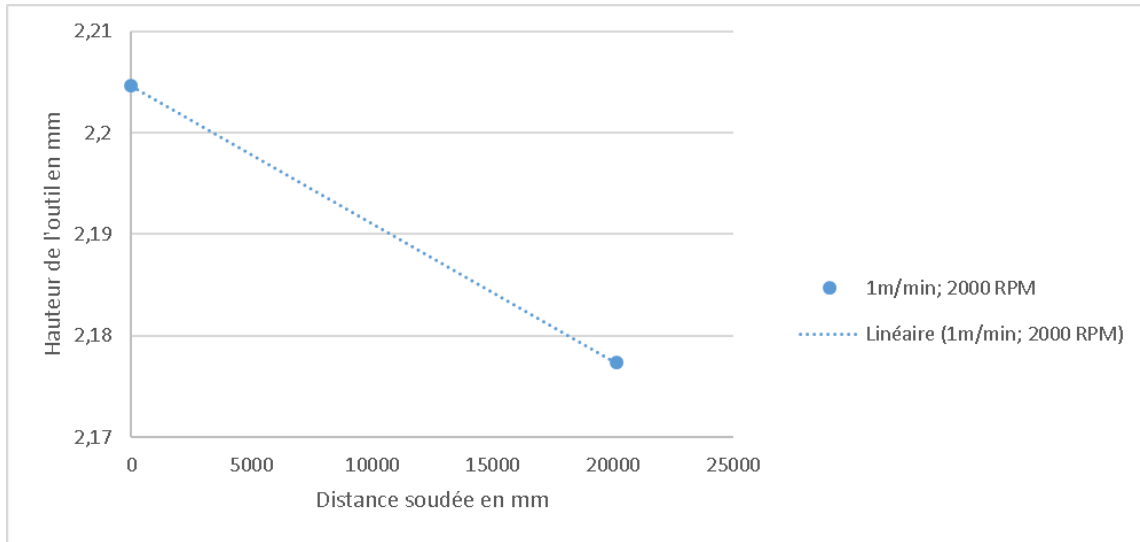


Figure 4.26: Hauteur de l'outil en fonction de la distance parcourue dans le couple de matériaux contenant de l'acier A1008

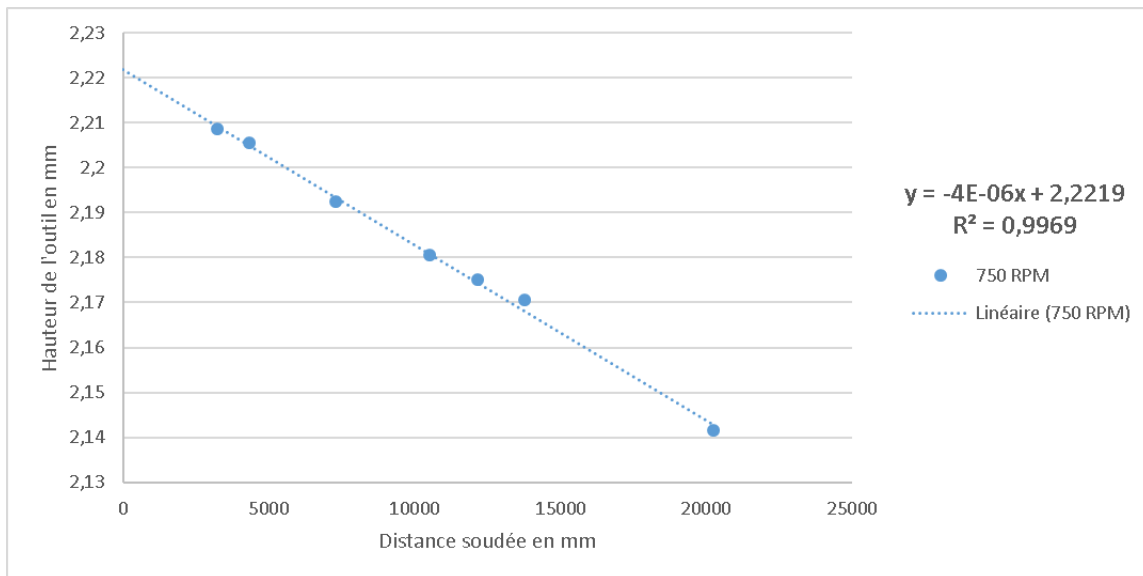


Figure 4.27: Hauteur de l'outil en fonction de la distance parcourue dans le couple de matériaux contenant de l'acier inoxydable 201LN à 750 RPM et 0,75 m/min

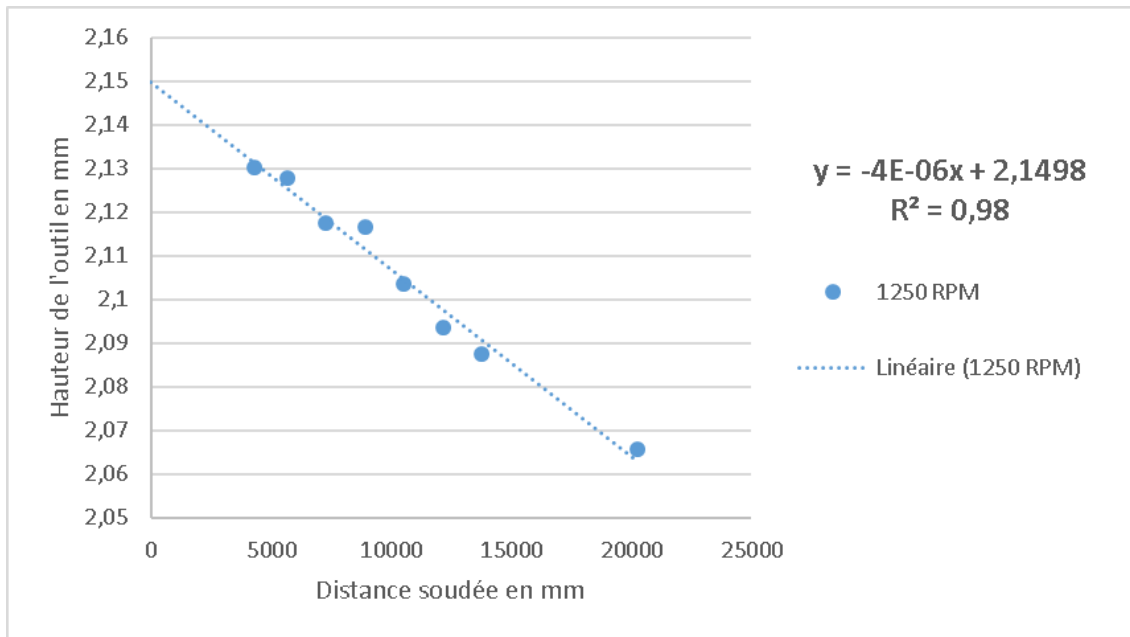


Figure 4.28: Hauteur de l'outil en fonction de la distance parcourue dans le couple de matériaux contenant de l'acier inoxydable 201LN à 1250 RPM et 1,25 m/min

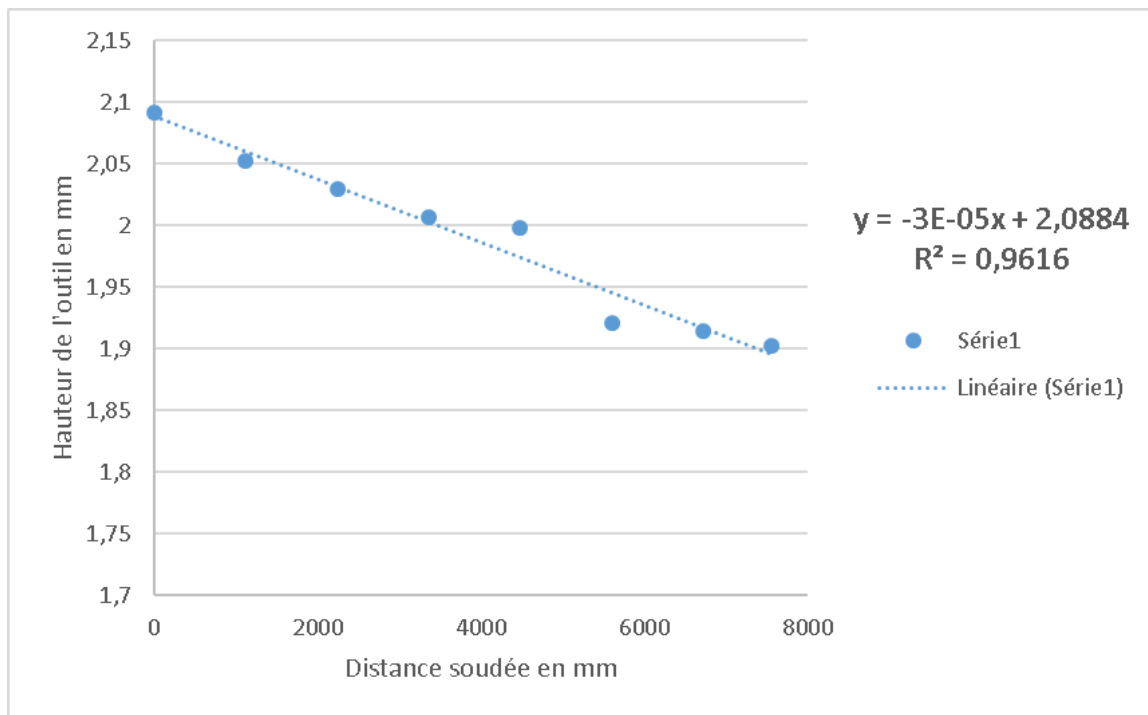


Figure 4.29: Hauteur de l'outil en fonction de la distance parcourue dans le couple de matériaux contenant de l'acier galvanisé DP800 à 1250 RPM et 1,25 m/min

Les figures 4.26 à 4.29 montrent les graphiques de la hauteur de l'outil en fonction de la distance parcourue en soudage. Certaines valeurs de départ sont manquantes puisque la recherche d'une bonne méthode de mesure des outils a été un processus évolutif jusqu'à l'obtention d'une méthode adéquate et les essais d'usure étaient déjà commencés. Toutefois, chaque outil a été mesuré de la même manière au départ. En ce qui concerne la figure 4.26 et 4.29, la hauteur a seulement été confirmée en profilométrie ce qui explique pourquoi la hauteur de départ de ces outils est disponible. Pour ce qui est des données manquantes pendant la période d'essai, il était impossible d'obtenir une lecture en profilométrie puisque la réflexion du faisceau optique était trop élevée et venait aveugler le capteur. Avec des valeurs de  $R^2$  de cette ampleur, il est évident que l'usure des outils est un processus linéaire dans le contexte de notre projet. Un taux d'usure unique peut donc être associé pour chaque cas.

Tableau 4.7: Taux d'usure en fonction des couples de matériaux

Couples de matériaux	AA6082-T6/A1008	AA5083 SPF/201LN@750 RPM	AA5083 SPF/201LN@1250 RPM	AA6082-T6/DP800
Taux d'usure (mm de perte de hauteur/mm de soudure)	1,35218254E -06	3,97185185E -06	4,1538642E -06	2,50436508E -05

Le tableau 4.7 expose les taux d'usure en fonction des couples de matériaux. Les taux d'usure sont représentés en mm de perte de hauteur par mm de soudure, ce qui indique la quantité de réduction de la hauteur en fonction de la distance parcourue. Les essais d'usure ont été effectués jusqu'à ce que les outils ne soient plus en mesure de produire la même qualité de soudure qu'au début. Ce paramètre a été contrôlé par la sous-épaisseur d'aluminium, l'épaisseur restante d'aluminium une fois que l'outil ait passé et la création de défauts de surface. Les combinaisons de paramètres opératoires sélectionnées pour réaliser les essais d'usure sont des combinaisons qui peuvent être utilisées en usine afin d'effectuer les tests dans des conditions fidèles aux conditions industrielles.

Il est intéressant de se concentrer sur les résultats d'usure pour les outils ayant servi dans le soudage des assemblages composés du 201LN ¼ dur. Le taux d'usure est plus élevé dans le cas de la combinaison de paramètres du 1250 RPM comparativement à la combinaison du 750 RPM même

si la résistance de l'acier inoxydable est théoriquement plus faible à 1250 RPM ( $\approx 600^\circ\text{C}$ ) selon les données du logiciel. L'augmentation de la force verticale et donc de la chaleur réduit la force longitudinale sur l'outil. Il est nécessaire d'augmenter la force verticale à mesure qu'on augmente la vitesse de rotation pour permettre à l'outil de produire davantage de chaleur et avoir une meilleure contention du matériel sous l'épaulement. Dans le cas du soudage avec l'aluminium, il faut éviter de trop s'approcher de la température de fusion. Cela implique que lorsque l'outil tourne plus rapidement, il faut augmenter la vitesse d'avance afin d'éviter d'injecter trop d'énergie localement. De plus, l'effet de la force verticale est plus important pour une même aire de contact réelle et donc augmente la contrainte locale. Le principe d'aire de contact réelle est couramment utilisé dans le domaine de la tribologie et est appliqué dans cette recherche. Son utilisation et sa mesure sont expliquées en détail dans la section suivante.

### 4.3 Présentation du modèle

Le modèle prend en compte plusieurs paramètres qui ont été présentés précédemment. Le but est d'adapter une méthode déjà présente dans la littérature à notre sujet d'étude. Cette section est consacrée à la présentation et au processus de validation de l'équation phénoménologique de prédiction de l'usure des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage. Au chapitre 2, la loi d'usure d'*Archard* a été utilisée comme loi fondamentale à notre étude. Elle est considérée comme phénoménologique puisqu'elle n'est pas basée uniquement sur les nombreuses équations de la mécanique des matériaux, mais davantage sur les phénomènes observés. De ce fait, il est relativement simple d'utiliser cette loi et de modifier quelques paramètres afin de l'adapter à différentes situations. C'est ce que *Kirk Fraser* a fait avec la formulation suivante (équation 2.4):

$$\dot{d}_{wear} = \frac{k_{wear}}{H_v(T)A_c} \|\bar{F}_N\| \|\bar{v}_T\|$$

En partant de cette formulation, le même processus de modification peut être utilisé pour l'adapter à notre situation. Connaissant les facteurs clés qui influencent l'usure des outils, il est maintenant possible de modifier la formulation adaptée au soudage par friction-malaxage avec ces paramètres.

La liste suivante rassemble les éléments déterminants de la durée de vie des outils qui ont été mis en lumière dans les chapitres et les sections précédentes:

- la dureté de la phase dure de l'acier et sa proportion en volume;
- la limite élastique de l'acier aux températures à l'interface et aux vitesses auxquelles les soudures sont produites;
- la dureté de l'outil (% de Co);
- les paramètres opératoires.

Ces éléments doivent se retrouver dans la formulation pour prendre en compte ce qui détermine physiquement le taux d'usure des outils. De plus, la signification physique de la loi de base doit aussi demeurer. Après plusieurs versions de la formulation, la version finale de la loi phénoménologique d'usure des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage se présente comme suit :

$$T_u = \frac{HV_h \left( \frac{1}{(1 - \%VHV_l)^n} \right) \left( \frac{\sigma_y @ 100s^{-1}}{\sigma_y @ 1s^{-1}} \right)^{k_g}}{(HV_o)A_{cr}} \|\bar{F}_N\| (f_M) \left( \frac{\omega}{v} \right) \quad (4.2)$$

$n = 0 \rightarrow$  Lorsqu'il y a seulement 1 phase dans l'acier

$n = 1 \rightarrow$  Lorsqu'il y a 2 phases dans l'Acier

$f_M = 1,00 \rightarrow$  Lorsque le mécanisme d'usure principal est l'abrasion

$f_M = 0,75 \rightarrow$  Lorsque le mécanisme d'usure principal est l'adhésion

Où :

- $T_u$  est le taux d'usure en mm de perte de hauteur/mm de soudure;

- $HV_h$  est la dureté de la phase la plus dure de l'acier mesuré en dureté *Vickers* ( $HV_l$  pour la phase la plus molle);
- $\%VHV_l$  est le pourcentage volumique qu'occupe la phase ductile de l'acier;
- $\sigma_y$  est la limite élastique de l'acier aux conditions indiquées;
- $HV_o$  est la dureté de l'outil mesuré en dureté *Vickers*;
- $A_{cr}$  est l'aire de contact réelle entre l'outil et l'acier;
- $\bar{F}_N$  est la force normale exercée lors de la soudure;
- $\omega$  est la vitesse de rotation de l'outil;
- $v$  est la vitesse d'avance de l'outil;
- $k_g$  est le coefficient empirique d'usure géométrique ( $\frac{mm^3 \text{ d'outil}}{N * Rot.}$ );
- $f_M$  est le coefficient de mécanisme d'usure.

Voici comment seront séparées les explications et la présentation des résultats reliés à l'équation 4.2. Dans un premier temps, les différents paramètres de l'équation seront expliqués ainsi que les raisons qui ont justifié l'emplacement et la présence dans l'équation. Ensuite, la méthode de calibration pour établir les indices et les coefficients seront présentés. Finalement, les résultats numériques et graphiques viendront terminer cette section. Naturellement, une section de discussion sera nécessaire pour éclaircir certains aspects du processus du projet de recherche.

L'impact de la dureté des aciers sur la durée de vie des outils devait intervenir dans l'équation et devait fournir un poids important à l'usure. C'est donc dans cet esprit que la dureté de la phase la plus dure de l'acier ( $HV_h$ ) vient s'imposer en premier dans l'équation. Dans un objectif de flexibilité de l'équation, le terme suivant a été ajouté pour être en mesure d'ajuster l'impact de la phase la plus dure sur l'usure. Le but est de donner un certain poids à la quantité volumique de la phase la plus dure. Ce poids est paramétré à l'aide du pourcentage volumique de la phase ductile de la nuance d'acier. Alors, plus le pourcentage de la phase ductile est faible, plus le poids de la phase dure de l'acier représente un poids important ( $1 - \%VHV_l$ ). Ensuite, il fallait être en mesure

d'utiliser ce poids avec une nuance d'acier contenant qu'une seule phase, d'où l'intérêt de l'indice  $n$ . L'acier bas carbone A1008 contient qu'une seule phase ce qui implique que le poids de la dureté de la phase dure, dans ce cas-ci, est total. L'indice  $n$  peut donc avoir la valeur de 1 lorsque l'acier en question possède deux phases et la valeur 0 lorsque l'acier à l'étude possède qu'une seule phase.

La logique derrière le terme  $\left(\frac{\sigma_y@100s^{-1}}{\sigma_y@1s^{-1}}\right)$  est que l'usure dépend de la contrainte exercée par l'acier aux températures et aux vitesses de déformation retrouvées dans les soudures dépendant de la combinaison de paramètres opératoires. Typiquement, comme il a été mentionné dans ce chapitre, la résistance du matériau a tendance à augmenter avec l'augmentation de la vitesse de déformation et a tendance à diminuer avec l'augmentation de la température. Pour prendre compte de la possible augmentation de cette limite due à la vitesse de déformation, la limite élastique est comparée à elle-même ( $\sigma_y@1s^{-1}$  est considéré comme le cas de référence) à une température donnée. Ce terme nous procure donc un nombre qui quantifie l'impact de la température sur la résistance de l'acier et donc, à générer de l'usure.

$HV_o$  (la dureté de l'outil) et  $A_{cr}$  (l'aire de contact réelle) sont des paramètres fixes. En effet, l'aire de contact réelle dépend de la profondeur de pénétration de l'extrémité de l'outil dans l'acier. La force verticale appliquée possède plusieurs utilités et l'une est de conserver une profondeur de pénétration constante dans l'acier. En ce qui concerne la dureté de l'outil, il a été montré que les températures atteintes dans nos soudures n'affectent pas significativement celle-ci. Afin de respecter la signification de la loi d'*Archard* de base, la force normale appliquée a été introduite dans la formule ce qui reporte une force en newtons sur une aire de contact en  $mm^2$ . Ce ratio donne une contrainte en compression appliquée sur l'extrémité du pion. Cette contrainte affecte l'usure par la modification des conditions à l'interface outil-acier dont le coefficient de frottement et le taux d'arrachement des carbures de l'outil par les phases dures des aciers. Étant donné que les paramètres opératoires influencent eux aussi l'usure, la vitesse de rotation et la vitesse d'avance ont été introduites sous forme de ratio à la fin de la formule. Il est nécessaire maintenant de détailler

le paramètre d'aire de contact réelle  $A_{cr}$ . L'utilisation de ce terme est nécessaire dans notre contexte puisque seule une partie de l'extrémité de l'outil est en contact direct avec l'acier à différents niveaux dépendant du couple de matériaux et de la longueur initiale de l'outil. C'est l'acier qui fait augmenter les forces verticales et latérales dans un assemblage dissimilaire et c'est ce qui explique des forces si élevées pour des épaisseurs semblables dans un assemblage composé uniquement d'alliage d'aluminium.

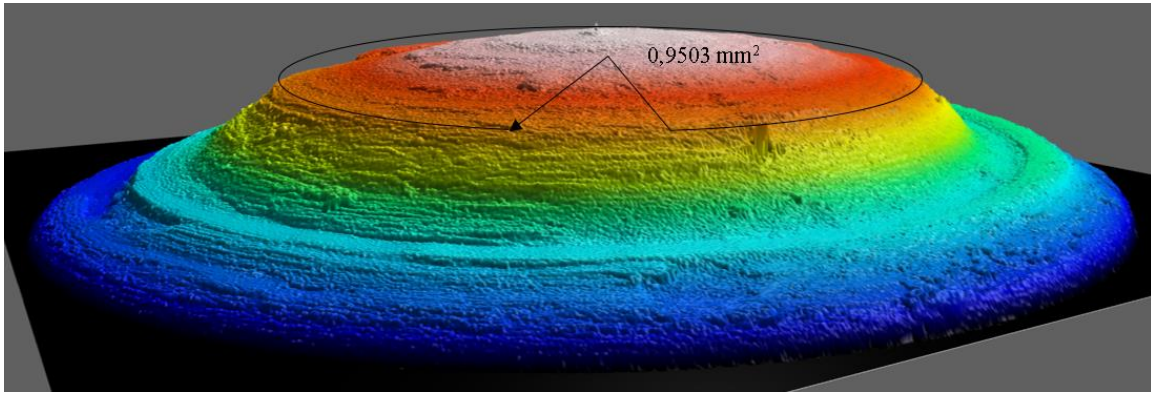


Figure 4.30: Mesure de l'aire de contact réelle sur une reproduction microtopographie

La figure 4.30 montre clairement cette surface préférentielle nommée aire de contact réelle. Elle a été mesurée en post-traitement sur les rendus de tous les outils faisant objet de l'étude en milieu et en fin des essais d'usure. Malgré de légères variations, l'aire de référence utilisée pour calculer les taux d'usure est de  $0,9503 \text{ mm}^2$ .

L'impact des différents mécanismes d'usure devait être aussi considéré dans l'estimation du taux d'usure. C'est pourquoi le coefficient  $f_M$  a été introduit, pour quantifier à différents niveaux les mécanismes d'usure qui n'ont pas tout le même effet sur l'outil. Au chapitre 2, il a été relevé par la littérature que le mécanisme d'usure le plus agressif est l'usure abrasive et que l'usure adhésive a un impact moindre sur l'outil. Ce coefficient est important à considérer pour quantifier l'impact des différents mécanismes sur l'usure (plus agressif pour l'abrasion donc  $f_M = 1$  et moins agressif pour l'adhésion donc  $f_M = 0,75$ ). Les valeurs données à ce coefficient sont empiriques et ont été définies comme telles puisque l'usure abrasive est le mécanisme générant le plus d'usures



(donc théoriquement 100%) et que l'usure adhésive génère moins d'usures que le mécanisme précédent (pas moins que 50% de l'usure générée par abrasion, mais pas plus que 100%). Alors, la valeur a été sélectionnée à mi-chemin entre les deux hypothèses. Mathématiquement, lorsque le coefficient de mécanisme d'usure augmente, le taux d'usure augmente aussi. À l'inverse, lorsque ce coefficient diminue, le taux d'usure diminue aussi. Les deux mécanismes d'usure principaux (l'adhésion et l'abrasion) sont définis comme élément gouverneur de la durée de vie des outils dans notre projet de recherche.

Finalement, la formule ne serait pas complète par rapport à la formulation de base d'*Archard* si aucun coefficient ne remplace le coefficient de frottement, élément caractéristique des conditions de glissement. Les coefficients de frottement sont déterminés par l'interaction entre deux matériaux. Ces coefficients sont générés par des essais de pion-sur-disque normalisés sur un tribomètre. La tribologie s'en sert pour quantifier et tabuler les coefficients de frottement de chaque couple de matériaux. C'est dans cet objectif que le coefficient  $k_g$ , le coefficient empirique d'usure géométrique, a été créé. Ce coefficient permet de prendre en compte phénoménologiquement l'effet de la forme de l'outil sur l'usure ainsi que la forme de la remontée d'acier. Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 2, la forme a un impact déterminant dans la durée de vie de l'outil, ce phénomène a d'ailleurs été relevé dans les travaux de *R. A. Prado* [4]. Dans les travaux présentés par *Tracie J. Prater* [33], les dimensions et la disposition du cylindre de matière plastique semblent dicter l'usure des outils. À la manière de ces travaux, le coefficient  $k_g$  détermine comment la forme des remontées d'acier affecte la durée de vie des outils. Le coefficient  $k_g$  n'a pas de valeur et doit donc être calibré. La calibration de ce coefficient doit se baser sur une valeur expérimentale comme les tests de pion-sur-disque en tribologie procurent les valeurs de coefficient de friction dynamique et statique.

La suite de cette section va décrire le cheminement mathématique qui a été employé pour trouver le coefficient empirique d'usure géométrique ce qui va mener à la présentation des résultats. Pour la suite, le paramètre  $T_{uc}$  représente le taux d'usure calculé.

En commençant par l'assemblage contenant l'acier inoxydable 201LN avec la combinaison de paramètres utilisant comme vitesse de rotation 750 RPM :

$$3,97185185E^{-06} = \frac{HV_h \left( \frac{1}{(1 - \%VHV_l)^n} \right) \left( \frac{\sigma_y @ 100s^{-1}}{\sigma_y @ 1s^{-1}} \right) k_g}{(HV_o) A_{cr}} \|\bar{F}_N\| (f_M) \left( \frac{\omega}{v} \right)$$

$$3,97185185E^{-06} \frac{mm \text{ d'outil}}{mm \text{ d'avance}} = \frac{(1059 \text{ MPa}) \left( \frac{1}{(1 - 1)^0} \right) \left( \frac{408 \text{ MPa}}{375 \text{ MPa}} \right) k_g}{(9610 \text{ MPa})(0,9503 \text{ mm}^2)} (16000 \text{ N})(0,75) \left( \frac{750 \text{ RPM}}{750 \text{ mm d'avance/min}} \right)$$

$$k_g = 2,62343952E^{-09} \frac{mm^3}{N * Rot.}$$

Il est important de préciser que les valeurs de dureté mesurées en dureté *Vickers* ont été transformées dans un format en unité métrique. Le but est de respecter l'usage des unités dans la formulation. Étant donné que cette dureté est mesurée en  $\left[ \frac{kgf}{mm^2} \right]$  ce qui ne représente pas une unité comparable si ce n'est qu'à elle-même. Le facteur de conversion est exposé dans l'étude présentée par *T. Sawa* [46] et est de  $9,80665 \frac{N}{kgf}$ , ce qui nous permet de transférer l'unité de mesure utilisée en nano indentation en une mesure en  $\left[ \frac{N}{mm^2} (MPa) \right]$ , unités couramment utilisées, et ce, en offrant plus de flexibilité pour l'application de la formule. Une valeur de dureté dépend de la plage utilisée en fonction de la forme et de la taille du pénétrateur du test de dureté. En effet, les pénétrateurs peuvent être différents des tests de dureté effectués sur les aciers comparativement aux tests de dureté effectués sur les échantillons d'outils. Le tableau 4.8 présente l'ensemble des valeurs de  $k_g$  qu'il est possible de calculer.

Tableau 4.8: Valeurs de coefficient empirique d'usure géométrique selon les combinaisons de paramètre opératoires et les matériaux d'assemblages

Couples de matériaux	AA6082-T6/A1008	AA5083 SPF/201LN@750 RPM	AA5083 SPF/201LN@1250 RPM	AA6082-T6/DP800
Taux d'usure expérimental (mm de perte de hauteur/mm de soudure)	1,35218254E -06	3,97185185E -06	4,1538642E -06	2,50436508E -05
Valeur de Kg selon les données expérimentales	2,17424112E -09	2,62343952E -09	2,41528523E -09	1,39566191E -09

Voici l'utilisation de prédiction de l'usure des outils avec l'assemblage composé de l'acier inoxydable 201LN avec une combinaison de paramètres opératoires utilisant 1250 RPM comme vitesse de rotation et la valeur de  $k_g$  qui a été trouvée ci-dessus :

$$T_{uc} = \frac{(1059 \text{ MPa}) \left( \frac{1}{(1-1)^0} \right) \left( \frac{271 \text{ MPa}}{223 \text{ MPa}} \right) (2,62343952E^{-09})}{(9610 \text{ MPa})(0,9503 \text{ mm}^2)} (17000 \text{ N})(0,75) \left( \frac{1250 \text{ RPM}}{1250 \text{ mm d'avance/min}} \right)$$

$$T_{uc} = 4,71365196E^{-06} \frac{\text{mm d'outil}}{\text{mm d'avance}}$$

En comparant la valeur calculée et le taux d'usure expérimentale au tableau 4.8, il y a seulement une erreur relative de 13%. Seul le couple de matériaux composé de l'acier inoxydable 201LN peut servir à valider la loi de prédiction de l'usure des outils, deux combinaisons de paramètres opératoires ont été testées. Les deux autres couples de matériaux peuvent seulement servir à trouver une valeur de  $k_g$  pouvant servir dans des expériences futures.

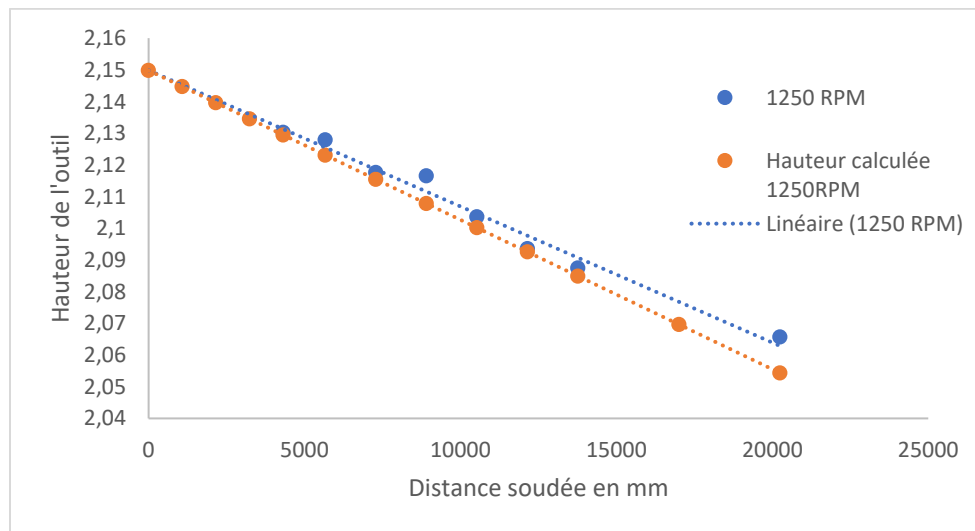


Figure 4.31: Graphique de la hauteur de l'outil en fonction de la distance soudée avec le 201LN et une valeur de  $k_g$  trouvée avec 750 RPM pour la combinaison de paramètres utilisant 1250 RPM comme vitesse de rotation

La figure 4.31 montre la différence de hauteur de l'outil après 20 000mm de soudure entre le cas expérimental et le cas calculé à l'aide de la formule de prédiction de l'usure en fonction des paramètres de calculs décrits dans le titre de la figure présenté ci-haut. Une différence de seulement 0,011mm est calculée. La démarche qui vient d'être faite pour trouver une valeur du taux d'usure pour le cas de la combinaison de paramètres opératoires utilisant 1250 RPM comme vitesse de rotation peut aussi être utilisée à l'inverse. C'est-à-dire, se servir du cas à 1250 RPM pour prédire l'usure de l'outil utilisé dans les soudures produites à 750 RPM comme vitesse de rotation. Par conséquent, la démarche s'écrit comme suit :

$$T_{uc} = \frac{(1059 \text{ MPa}) \left( \frac{1}{(1-1)^0} \right) \left( \frac{489 \text{ MPa}}{420 \text{ MPa}} \right) (2,41528523E^{-09})}{(9610 \text{ MPa})(0,9503 \text{ mm}^2)} (16000 \text{ N})(0,75) \left( \frac{750 \text{ RPM}}{750 \text{ mm d'avance/min}} \right)$$

$$T_{uc} = 3,91310123E^{-06} \frac{\text{mm d'outil}}{\text{mm d'avance}}$$

En considérant une valeur expérimentale de  $3,97185185E^{-06}$  inscrit dans le tableau 4.7, obtient une erreur relative de 1,48% sur le taux d'usure. Clairement, la démarche est plus adaptée lorsque le cas le plus agressif (1250 RPM) est utilisé pour calculer les autres combinaisons de paramètres.

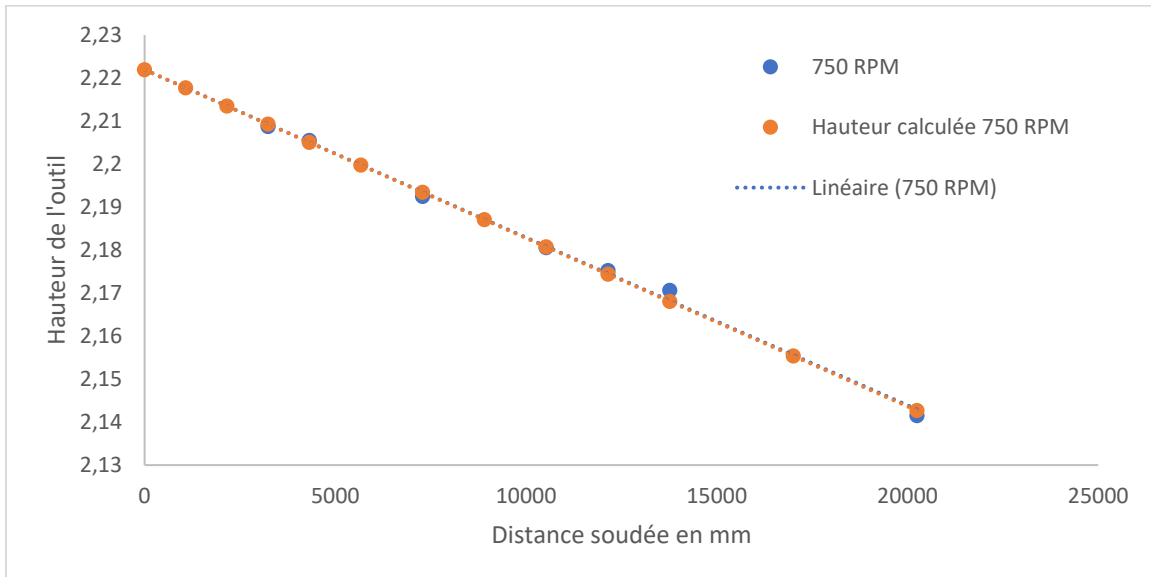


Figure 4.32: Graphique de la hauteur de l'outil en fonction de la distance soudée avec le 201LN et une valeur de kg trouvée avec 1250 RPM pour la combinaison de paramètres utilisant 750 RPM comme vitesse de rotation

La figure 4.32 montre à quel point la prédiction de la durée de l'outil est précise. La différence de hauteur de l'outils après 20 000mm entre le cas expérimental et le cas calculé est seulement de 0,0011mm. Devant un résultat aussi concluant, il est vital de remettre en question les valeurs et la démarche utilisées afin d'écarter les redondances de valeurs. Un sommaire de la démarche est nécessaire :

- le taux d'usure expérimental de la combinaison de paramètre utilisant 1250 RPM comme vitesse de rotation a été utilisé pour trouver la valeur de  $k_g$ , valeur caractéristique à un couple de matériaux;
- en utilisant le même matériau d'outil, les seules valeurs qui diffèrent du cas d'essai de soudage utilisant 750 RPM comme vitesse de rotation sont les paramètres opératoires et les limites élastiques;
- en comparant le ratio de limites élastiques des deux cas (750 RPM et 1250 RPM), on arrive à des valeurs similaires.

Ces points nous aident à poser un diagnostic clair sur la validité de la formule de prédiction de l'usure et de la validité de la démarche de calcul employée. En somme, seules la force verticale ainsi que la température (et donc les limites élastiques) sont différentes pour les conditions de soudage testées. De ce fait, il est normal d'arriver un résultat aussi précis puisqu'il n'y a pas beaucoup de changement dans les valeurs utilisées.

Finalement, pour étudier adéquatement la durée de vie des outils, il faut regarder deux éléments importants : où se déroule l'usure et comment elle s'initie et se propage. Dans les sections et chapitres précédents, comment l'usure prend place dans un tel système tribologique a été abordé et à certains égards, prédit. Il a été mentionné à plusieurs reprises que l'usure était considérée seulement à un endroit et avec raison, à l'extrémité de l'outil. Avec le système de mesure de l'usure utilisé, il a été possible de topographier la surface où l'usure est située. Le fonctionnement de la microtopographie 3D a été présenté au chapitre 3, mais certains détails de comment la mesure est effectuée sont manquants et sont importants à décrire. Il faut d'abord préciser que les crayons

optiques ont tous une plage de mesure prédéterminée puisque la focalisation du faisceau optique sera différente de plage en plage ce qui implique de choisir le crayon adapté pour la mesure à effectuer. Dans notre cas, un crayon pouvant mesurer seulement 1100  $\mu\text{m}$  a été utilisé ce qui a simplifié le processus de mesure. Le faisceau optique était placé au centre de l'outil avec le même rayon d'action pour chaque mesure. De cette manière, il était possible de confirmer si la zone analysée avait réduit en diamètre et la hauteur de l'outil à partir du commencement du flanc de l'outil pouvait être mesurée tout en ayant une référence. La perte de hauteur pouvait donc être mesurée adéquatement et relativement rapidement en post-traitement.

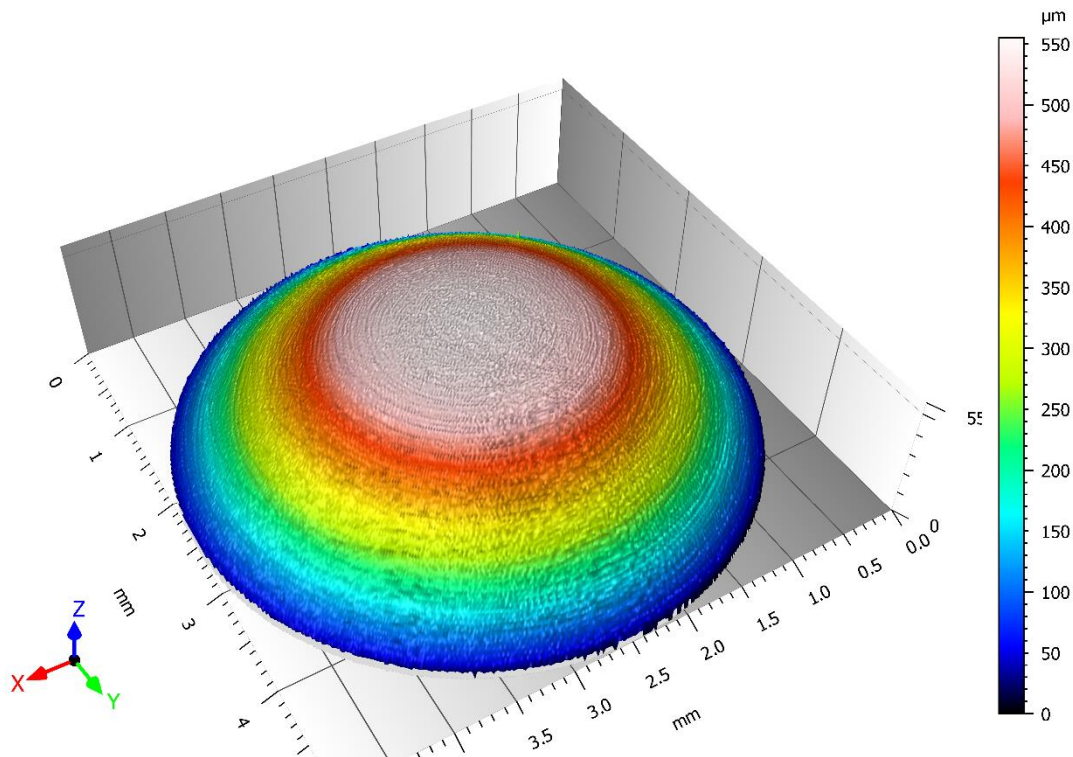
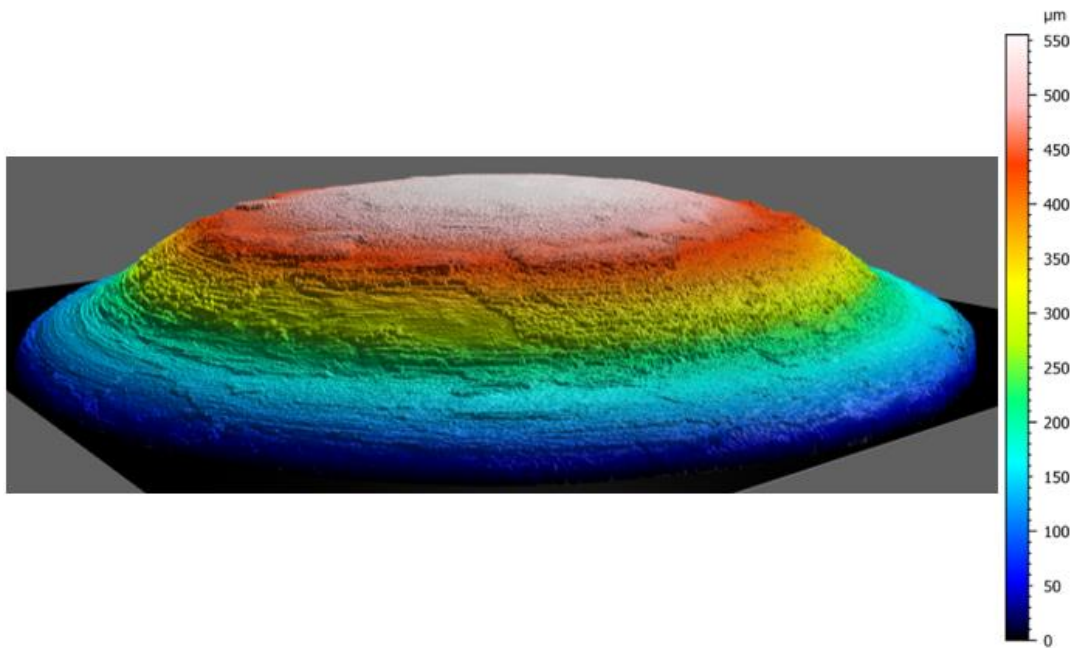


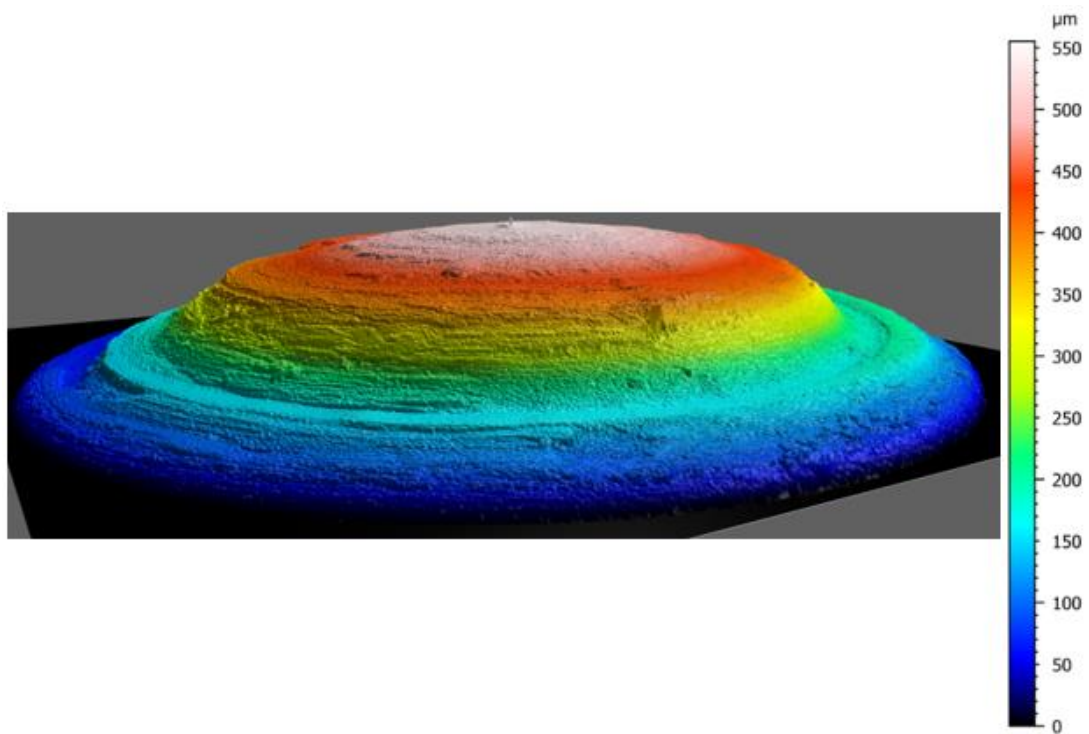
Figure 4.33: Microtopographie de l'extrémité d'un outil neuf

La figure 4.33 montre la microtopographie de l'extrémité d'un outil neuf. La précision du rendu de la figure 4.33 dépend des intervalles de prises de mesures communément appelés des pas. Plus les pas sont petits, plus la définition du rendu sera augmentée. Tous les outils ont été mesurés avec

sensiblement le même pas ce qui procure une image de qualité permettant de voir les microsillons laissés par le meulage de l'outil pour lui donner sa forme finale.

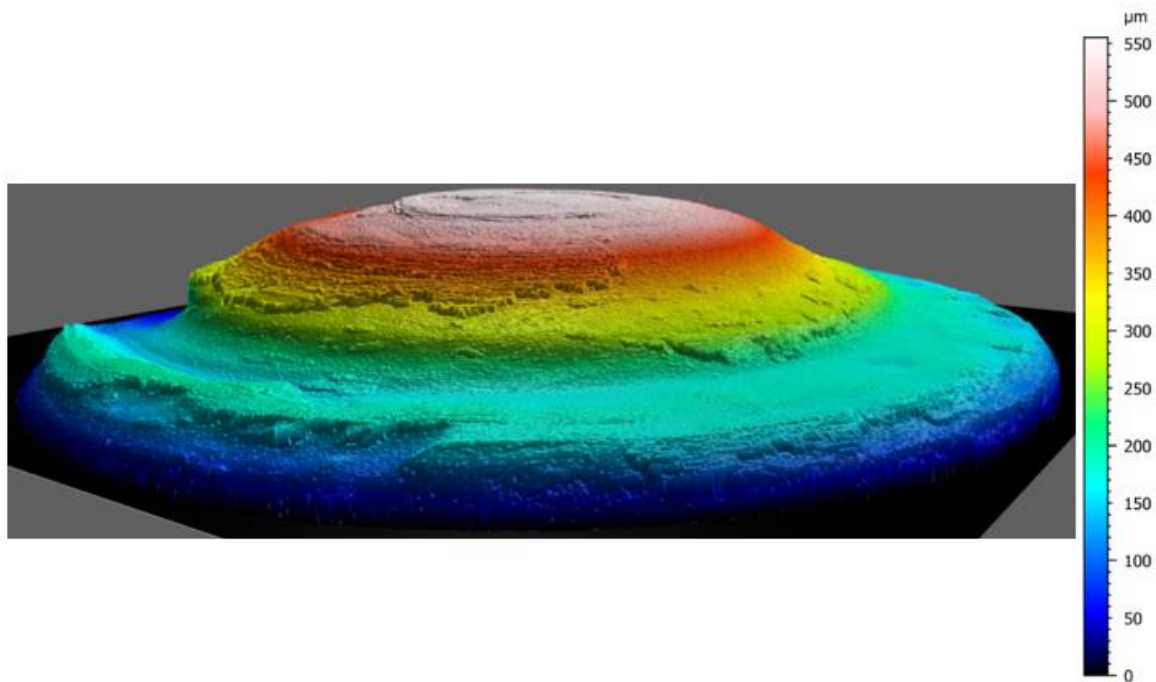


*Figure 4.34: Microtopographie de l'extrémité de l'outil utilisé dans l'assemblage 201LN ¼ dur à 750 RPM à la fin des essais d'usure*



*Figure 4.35: Microtopographie de l'extrémité de l'outil utilisé dans l'assemblage 201LN ¼ dur à 1250 RPM à la fin des essais d'usure*

Les figures 4.34 et 4.35 montrent les microtopographies des sections analysées des outils utilisés pour l'acier inoxydable 201LN ¼ dur à la fin des essais d'usure. Il est intéressant de remarquer une réduction du diamètre de la partie centrale sur la hauteur du flanc du pion entre le commencement du bombé et l'extrémité de l'outil. Ce rétrécissement est plus important à 1250 rpm comparativement à 750 rpm. Bien que la force verticale soit plus élevée à 1250 rpm, le couple est plus faible ce qui laisse présager que l'impact de la vitesse de rotation est déterminant pour la diminution du diamètre à la mi-hauteur du bombé. Cet impact de la vitesse de rotation devient plus élevé à mesure que la vitesse de rotation augmente. On peut le voir facilement dans le cas de l'outil utilisé dans les essais d'usure du couple de matériaux A1008.



*Figure 4.36: Microtopographie de l'extrémité de l'outil utilisé dans les essais d'usure avec le A1008*

La figure 4.36 montre l'outil à la fin des essais d'usure du couple de matériaux utilisant le A1008. La vitesse de rotation dans ce cas-ci est de 2000 rpm. L'extrémité de l'outil est beaucoup affectée au niveau de son diamètre à la mi-hauteur malgré une force verticale considérablement moindre et des propriétés de l'acier bas carbone A1008 nettement inférieures à l'acier inoxydable



201LN. Cet outil a été analysé après la même longueur de soudure que l'outil utilisé dans les assemblages de l'acier inoxydable.

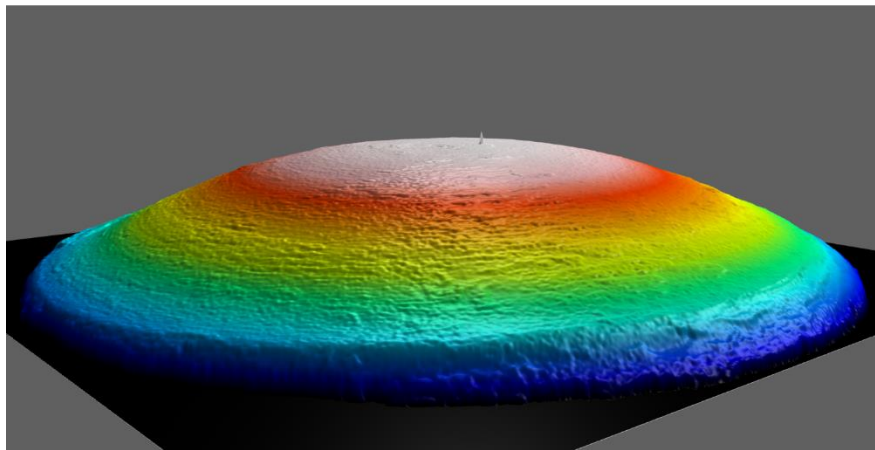
#### 4.4 Discussion générale

À ce stade-ci, il est important de prendre les résultats dans l'ensemble et d'effectuer une analyse adéquate afin de faire ressortir les bons éléments. Commençons d'abord par les fenêtres opératoires pour chaque couple de matériaux. Ces fenêtres sont le résultat d'une méthode couramment utilisée dans l'industrie pour définir une plage viable de paramètres opératoires. Le soudage par friction-malaxage est le résultat d'une combinaison de chaleur en quantité suffisante jusqu'à l'interface des matériaux afin d'augmenter la malléabilité de ceux-ci et ainsi, obtenir une bonne dispersion dans l'un et/ou l'autre matériau. Certaines combinaisons de paramètres opératoires ont été exclues puisque des défauts volumétriques étaient présents ce qui réduit possiblement la résistance de l'interface et augmente les sites d'initiation en fatigue. Les soudures ont été classées d'après leur résistance mécanique en traction statique, la présence plus ou moins marquée de remontée d'interface (*hooking*) ainsi que des forces générées permettant une utilisation robotique (force verticale  $\leq 15\text{kN}$  et force longitudinale  $\leq 3.5\text{kN}$ ).

Un autre point à aborder est la lecture de la température. Le thermocouple utilisé est très petit ce qui réduit son temps de réaction. Tout système a un délai de réaction, toutefois, des essais de réponse ont été faits et un retard temporel faiblement perceptible a été remarqué. Le but était d'avoir un système qui pouvait mesurer la température le plus près possible de l'interface lorsque l'outil est en fonctionnement établi. Environ 85% des combinaisons de paramètres affichaient une lecture de température stable, ce qui indique que la température a été mesurée en régime complètement stabilisé. Les 15% restant ont affiché une lecture de température dans le domaine quasi stable, c'est-à-dire qu'une rampe en température était toujours présente, mais près d'une valeur constante. L'établissement d'un régime complètement stable pour certains paramètres aurait nécessité l'utilisation d'une longueur totale de soudage plus élevée, ce qui n'a pas été réalisé étant donné que

les matériaux reçus par les partenaires industriels étaient en quantité restreinte. Toutefois, aucune de ces combinaisons de paramètres n'a dépassé la température maximale de l'ensemble des essais, soit près de 600°C.

Les résultats d'usure montrent une tendance linéaire à la baisse qui a été présentée dans les sections précédentes. D'ailleurs, au chapitre 3, plusieurs méthodes de mesure ont été testées afin de quantifier l'usure d'une manière fiable et efficace. La profilométrie a permis d'obtenir des résultats rapidement et surtout, ils ont pu être traités facilement en post-analyse afin d'écarter virtuellement les morceaux d'acier collés sur l'extrémité de l'outil. Il a été confirmé que la forme de l'outil reste similaire malgré l'usure rapide qu'elle peut montrer et confirme donc que la méthode employée est adéquate. En ce qui concerne les mécanismes d'usure, il est clair que l'assemblage du DP800 crée une usure abrasive.



*Figure 4.37: Extrémité du pion utilisé dans les essais de soudage pour l'assemblage contenant l'acier DP800 galvanisé après 7 560mm de soudure (l'outil est en fin de vie)*

Malgré l'absence de légende, on peut voir que l'outil qui a servi aux essais de soudage dans l'assemblage contenant le DP800 après 7 560mm de soudure sur la figure 4.37 ressemble à l'extrémité de l'outil neuf à la figure 4.33. Cette comparaison permet de dire que les mécanismes d'usure en place lors du soudage du DP800 provoquent une réduction uniforme en hauteur et circonférentielle de l'outil. En comparant les rendus topographiques des extrémités des pions des outils en fin de vie des trois couples de matériaux aux figures 4.34, 4.35, 4.36 à la figure 4.37, il est

évident que les mécanismes d'usure sont différents. Sachant que le mécanisme d'usure des essais de soudage avec le DP800 est entièrement dû à l'abrasion, il est logique de penser que l'usure dominante observée sur les outils utilisés sur les deux autres couples de matériaux est due entre autres à l'adhésion. Il n'est pas exclu que l'usure abrasive soit aussi présente dans ces derniers cas.

## CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 5.1 Conclusion

Le soudage par friction-malaxage est une technologie qui gagne à être employée dans l'industrie, notamment par son apport de chaleur moindre permettant de limiter la déformation et d'augmenter les propriétés mécaniques post-soudage. De plus, cette méthode permet d'assembler des matériaux possédant des températures de fusion bien différentes comme l'aluminium et l'acier. Ces éléments ont un attrait élevé face à l'industrie du transport, mais exposent un problème difficilement inévitable étant donné la nature du procédé : l'usure des outils rencontrée lors du soudage de matériaux durs tel que l'acier. Cette usure a donc été soulevée comme composante d'étude pour les applications visées par le groupe industriel ALTec du CNRC. Cette recherche porte donc sur l'étude de l'usure des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage dans un assemblage dissimilaire en recouvrement contenant des matériaux durs. Son objectif était de valider un modèle prédictif de l'usure pour des paramètres de procédé applicables en production. À l'aide d'outils en WC-25%Co, des fenêtres opératoires ont pu être établies pour les trois assemblages dissimilaires suivants, contenant différentes nuances d'acier : AA5083 SPF/ Acier inoxydable 201LN ¼ dur; AA6082-T6/DP800 galvanisé; AA6082-T6/A1008.

Dans le but de connaître les conditions à l'interface de la soudure, un système de mesure de température a été installé et les données ont été présentées. Finalement, les mesures d'usure des outils ont été fournies et ont servi à construire une formulation dérivée de la loi d'usure générale d'*Archard* dans le but de pouvoir prédire cette usure en se basant sur les phénomènes en présence. Par la suite, la loi d'usure phénoménologique a été calibrée et mise à l'épreuve afin de valider si la prédiction de l'usure était adéquate par rapport aux cas expérimentaux. De cette démarche est ressortie plusieurs points importants qui ont été soulevés dans le chapitre de présentation des résultats et qui sont essentiels à la compréhension des finalités de cette recherche. Il est donc intéressant d'exposer ces points de façon claire :

- l'étude de la revue de littérature a permis de mettre en lumière les mécanismes d'usure qui sont dominants dans les soudures par friction-malaxage dans différents aciers. Dans les études répertoriées, les matériaux d'assemblage et les matériaux d'outils étaient différents de ceux utilisés dans cette recherche ce qui influence nécessairement l'usure des outils. Il a été toutefois démontré par certains travaux antérieurs que les mécanismes d'usure en action dépendent des interactions aux contacts de l'outil et des matériaux d'assemblage. De ce fait, la microstructure des matériaux et les types de sollicitations engendrés par le soudage par friction-malaxage provoquent majoritairement de l'usure adhésive et de l'usure abrasive;
- les deux types d'usures sont toujours présents en même temps, mais dans des proportions qui diffèrent en fonction des paramètres opératoires et des caractéristiques des matériaux d'assemblage telles que la microstructure et la dureté des phases des aciers;
- la loi d'usure généralisée d'*Archard* est à la base de la formulation de *K. Fraser*. Cette dernière est utilisée pour bâtir une formulation phénoménologique de prédiction de l'usure des outils utilisés dans le soudage par friction-malaxage pour des assemblages en recouvrement aluminium et acier;
- pour réaliser les essais d'usure dans un cadre industriel, des combinaisons de paramètres opératoires optimisés (ou fenêtres opératoires) ont été identifiées sur les trois couples de matériaux définis dans cette étude, ce qui a permis de définir un cadre de travail optimal. Ces fenêtres opératoires produisent des soudures viables en production et certaines de ces combinaisons ont été employées pour effectuer les essais d'usure;
- en analysant ces fenêtres opératoires, des conclusions peuvent être tirées ce qui permettra ultimement d'effectuer moins de soudures d'essai pour une gamme de matériaux. La principale conclusion que l'analyse peut relever est que l'apport de chaleur par les paramètres opératoires est primordial à contrôler afin d'éviter une remontée d'acier trop

- importante, un morcellement trop important à l'interface de la soudure, un manque de miscibilité des matériaux d'assemblage et l'apparition de phases intermétalliques fragiles;
- la majorité de ces défauts d'assemblage sont reliés à la diminution de la limite élastique des matériaux. Cette diminution influence aussi l'usure des outils en réduisant ou en augmentant le couple nécessaire à la production de la soudure. Ce couple a un impact sur les contraintes que l'outil subit pendant la soudure et influence nécessairement l'usure;
  - une température a pu être associée à la majorité des combinaisons de paramètres par l'entremise d'un système de lecture de températures sans fil relié à un fin thermocouple ce qui améliore la réponse en temps de la mesure;
  - en considérant la température lue comme la température moyenne dans la soudure, les propriétés mécaniques des matériaux peuvent être trouvées et ces propriétés peuvent être utilisées pour prédire l'usure des outils;
  - en effectuant les essais d'usure avec des paramètres opératoires constants, les taux d'usure pour chaque couple de matériaux peuvent être connus grâce à une méthode et un système de mesures de l'usure précis. Il a été montré que les aciers des assemblages en recouvrement ont des effets déterminants pour l'usure des outils. En effet, la microstructure des aciers influence davantage cette usure que la limite ultime des matériaux soudés;
  - une formule phénoménologique a pu être écrite en prenant en compte les éléments qui influencent l'usure des outils, tout en gardant le sens de la formulation de base d'*Archard* encore utilisée aujourd'hui pour sa simplicité et sa polyvalence. Les coefficients  $k_g$  (coefficient empirique d'usure géométrique) et  $f_M$  (coefficient de mécanisme d'usure) sont expérimentaux et influencent beaucoup la prédiction du taux d'usure. Ils doivent donc être considérés comme des éléments variables dans la formulation au même titre que les coefficients d'usure normalisés dans la loi d'usure généralisée d'*Archard*;
  - une usure circonférentielle a été remarquée sur les outils. Ce type d'usure semble être fonction de la vitesse de rotation de l'outil et peut modifier le coefficient empirique d'usure

géométrique  $k_g$ . L'évolution de la géométrie de l'outil n'étant pas prise en compte dans les calculs, ce type d'usure pourra potentiellement impacter la prédiction de l'usure globale en changeant le mouvement interne du matériel dans la soudure.

## 5.2 Recommandations

Dans le but de connaître les limites de ce projet, il est important de faire ressortir quelques recommandations afin de cerner les éléments qui peuvent être améliorés. Les recommandations suivantes doivent être considérées comme des modifications à la méthodologie et au processus de réalisation du projet dans le cas où le cadre de cette étude serait perpétué :

- 1) afin de cerner davantage les conditions à l'interface, il serait intéressant d'effectuer une simulation numérique du transfert de chaleur dans l'outil en considérant l'ensemble des éléments extérieurs tels que la convection autour de l'outil, la perte de chaleur due à la radiation avec le milieu et le transfert de chaleur par conduction avec les pièces soudées. De cette manière, une meilleure extrapolation de la température à l'interface pourra être faite en utilisant les mesures du thermocouple présentement en place;
- 2) l'aire de contact réelle doit être déterminée en fonction de la profondeur de pénétration de l'extrémité de l'outil dans l'acier. Elle ne sera donc pas fixée pour l'ensemble des couples de matériaux;
- 3) un outil avec une teneur moins élevée en cobalt doit être utilisé pour réaliser les mêmes essais d'usure et dans les mêmes conditions que ce projet. Ceci permettrait de déterminer si les mécanismes d'usure seraient modifiés ( $f_M$ ) et de confirmer l'influence de la dureté de l'outil sur l'usure;
- 4) l'intégration de la loi phénoménologique d'usure décrite dans un code de simulation numérique permettrait d'évaluer l'usure à différents endroits sur l'outil et serait fonction du taux de déformation local. Une valeur de perte en volume serait donc mesurable et permettrait d'identifier si des zones critiques sur l'outil favorisent une usure prématurée.

## RÉFÉRENCES

- [1] L. St-Georges and L. I. Kiss, *Le soudage par friction-malaxage; Principes et applications*: Les Presses de l'aluminium, 2015.
- [2] O. S., "Application of an FSW continuous welding technology for steel and aluminum to an automotive subframe," presented at the SAE 2013 World congress and exhibition, 2013.
- [3] F. C. Liu, Y. Hovanski, M. P. Miles, C. D. Sorensen, and T. W. Nelson, "A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure and properties," *Journal material science and tehcnology*, vol. 34, pp. 39-57, 2018.
- [4] R. A. Prado, L. E. Murr, K. F. Soto, and J. C. McClure, "Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al 6061+20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 349, pp. 156-165, 2003.
- [5] R. Zettler, S. Lomolino, J. F. D. Santos, T. Donath, F. Beckmann, T. Lippman, *et al.*, "Effect of tool geometry and process parameters on material flow in FSW of an AA2024-T351 alloy," *Welding in the world*, vol. 49, pp. 41-46, 2005.
- [6] P. Dabeer and G. Shinde, "Perspective of friction stir welding tools," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 13166-13176, 2018.
- [7] S. Yazdanian and Z. W. Chen, "Effect of friction stir lap welding conditions on joint strength of aluminium alloy 6060," presented at the IOP conference series: Materials science and engineering 4, 2009.
- [8] R. Hatano, T. Ogura, T. Matsuda, T. Sano, and A. Hirose, "Relationship between intermetallic compound layer thickness with deviation and interfacial strength for dissimilar joints of aluminium alloy and stainless steel," *Materials science and Engineering: A*, vol. 735, pp. 361-366, September 26 2018.
- [9] S. Bozzi, A. L. Helbert-Etter, T. Baudin, B. Criqui, and J. G. Kerbiguet, "intermetallic compounds in Al6016/IF-steel friction stir sport welding," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, pp. 4505-4509, 2010.
- [10] T. Yasui, M. Yamaguchi, and M. Fukumoto, "Growth behaviour of intermetallic compound in weld interface of dissimilar metal weld by friction stirring."
- [11] R. V. Milligan, W. H. Koo, and T. E. Davidson, "The Bauschinger effect in high-strength steel," *Transactions of the ASME*, pp. 480-488, 1966.
- [12] A. Arora, Z. Zhang, A. De, and T. DebRoy, "Strains and strain rates during friction stir welding," *Scripta Materialia*, vol. 61, pp. 863-863, 2009.
- [13] T. J. Lienert, W. L. S. Jr., B. B. Grimmett, and R. W. Warke, "Friction stir welding studies on mild steel," *The welding Journal*, pp. (1-9)-S, 2003.
- [14] J.-H. Cho, D. E. Boyce, and P. R. Dawson, "Modeling strain hardening and texture evolution in friction stir welding of stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 398, pp. 146-163, 2005.
- [15] R. Nandan, G. G. Roy, T. J. Lienert, and T. Debroy, "Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel," *Acta Materialia*, vol. 55, pp. 883-895, 2007.
- [16] A. D. Berman, W. A. Ducker, and J. N. Israelachvili, "Origin and characterization of different stick-slip friction-mechanisms " *Langmuir*, vol. 12, pp. 4559-4563, 1996.
- [17] K. Fraser, "Robust and efficient meshfree solid thermo-mechanics simulation of friction stir welding," Doctor of philosophy in mechanical engineering, Département des sciences appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, 2017.
- [18] S. Cui, Z. W. Chen, and J. D. Robson, "A model relating tool torque and its associated power and specific energy to rotation and forward speeds during friction stir welding/processing," *International Journal Machine tools and manufacture*, vol. 50, pp. 1023-1030, 2010.



- [19] F. P. Bowden and L. Leben, "The nature of sliding and the analysis of friction," *Laboratory of physical chemistry*, pp. 17-24, 1939.
- [20] F. P. Bowden and D. Tabor, "Mechanism of metallic friction," *Nature*, vol. 150, p. 197, 08/15/online 1942.
- [21] J. F. Archard and W. Hirst, "The wear of metals under unlubricated conditions," *Proceedings of the royal society A*, vol. 236, 1956.
- [22] B. Bhushan, *Modern tribology handbook* vol. V.1: CRC Press, 2001.
- [23] J. D. Gates, "Two-body and three-body abrasion: A critical discussion," *Wear*, vol. 214, pp. 139-146, 1998.
- [24] A. Misra and I. Finnie, "A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester," *Wear*, vol. 60, pp. 111-121, 1980.
- [25] C. Allen and A. Ball, "The abrasive-corrosive wear of stainless steels," *wear*, vol. 74, pp. 287-305, 1981-1982.
- [26] M. Eff, "The effect of tool texture on tool wear in friction stir welding of X-70 steel," Master of science, Welding engineering, The Ohio state University, 2012.
- [27] B. T. Thompson, "Tool degradation characterization in the friction stir welding of hard metals," The Ohio state university, 2010.
- [28] Y. V. M. e. coll., "Influence of temperature, grain size and cobalt content on the hardness of WC-Co alloys," *Refractory Metals & Hard Materials*, vol. 17, pp. 39-44, 1998.
- [29] D. Zhu, X. Zhang, and H. Ding, "Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys," *International Journal Machine tools and manufacture*, vol. 64, pp. 60-77, 2013.
- [30] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* vol. Fourth Edition in SI units, 2011.
- [31] J. F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces," *journal of applied physics*, vol. 24, pp. 981-988, 1953.
- [32] E. M. Bortoleto, A. C. Rovani, V. Seriacopi, F. J. Profito, D. C. Zachariadis, I. F. Machado, *et al.*, "Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test," *Wear*, vol. 301, pp. 19-26, 2013.
- [33] T. J. Prater, A. M. Strauss, G. E. Cook, B. T. Gibson, and C. D. Cox, "A phenomenological model for tool wear in friction stir welding of metal matrix composites," *Metallurgical and materials transactions A*, vol. 44A, 2013.
- [34] A. Zmitrowicz, "Wear patterns and laws of wear - A review," *Journal of theoretical and applied mechanics*, vol. 44, pp. 219-253, 2006.
- [35] A. F. Hasan, C. J. Bennett, P. H. Shipway, S. Cater, and J. Martin, "A numerical methodology for predicting tool wear in friction stir welding," *Journal of materials processing technology*, vol. 241, pp. 129-140, 2016.
- [36] P. Shalot and A. Arora, "Numerical model for prediction of tool wear and worn-out pin profile during friction stir welding," *Wear*, vol. 408-409, pp. 96-107, 2018.
- [37] D. M. Neto and P. Neto, "Numerical modeling of friction stir welding process: A literature review," *International Journal of advanced manufacturing technologies*, vol. 65, pp. 115-126, 2013.
- [38] R. S. Mishra and M. W. Mahoney, *Friction stir welding and processing*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2006.
- [39] S. Argawal, P. E. Krajewski, and L. L. Briant, "Texture development and Dynamic Recrystallization in AA5083 during Superplastic Forming at Various Strain Rates," presented at the TMS, 2004.
- [40] K. Tsuzaki, H. Matsuyama, M. Nagao, and T. Maki, "High-strain rate superplasticity and role of dynamic recrystallization in a superplastic duplex stainless steel," *Materials transactions*, vol. 31, p. 12, 1990.

- [41] A. International, "Standard test methods for tension testing of metallic materials," vol. E8, ed: ASTM International, 2009.
- [42] M. A. Waheed, L. O. Jayesimi, S. O. Ismail, and O. U. Dairo, "Modeling of heat generations for different tool profiles in friction stir welding: study of tool geometry and contact conditions," *Journal of applied and computational mechanics*, vol. 3, p. 23, 2017.
- [43] J. R. Davis, *Aluminum and Aluminum alloys*, 1993.
- [44] A. Handbook, "Alloy phase diagrams," *ASM international*, vol. 3, p. 2.319, 1992.
- [45] K. Herrmann, *Hardness testing: Principles and applications*: ASM international, 2011.
- [46] T. Sawa, "Correlation between nanoindentation test result and Vickers hardness," presented at the Metrology in modern context, Thailand, 2010.
- [47] G. Z. L. Vincent, *Matériaux et contacts : une approche tribologique*, 1re éd ed. Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1998.
- [48] Y. Cao, B. Karsson, and J. Ahlström, "Temperature and strain rate effects on the mechanical behavior of dual phase steel," *Materiel Science and engineering A*, vol. 636, pp. 124-132, 2015.
- [49] R. Kumar, V. Pancholi, and B. R. P, "Material flow visualization and determination of strain rate during friction stir welding," *Journal materials Proccessing and technologies*, vol. 255, pp. 470-476, 2018.

## ANNEXE A

*Tableau A.1: Résultats des essais de traction simple des assemblages AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur*

AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN 1/4 dur										
Identification	Épaisseur	Largeur	Énergie Spécifique	Pas d'avance	Vitesse de rotation	Vitesse d'avance	Charge maximale	Contrainte maximale	Charge normalisée	Localisation de la rupture
	mm	mm	J/mm	mm/Rev	RPM	m/min	N	MPa	N/mm	
1a T1	1,75	24,39					11857	277,8	486,1	Bonne soudure, côté avance dans l'aluminium
1a T2	1,75	26,14					12604	275,5	482,2	Bonne soudure, côté avance dans l'aluminium
1a T3	1,76	26,42					12929	278,1	489,4	Bonne soudure, côté avance dans l'aluminium
Moyenne	1,75	25,65	330,8	0,6	500	0,30	12463	277,1	485,9	
Dev std	0,01	1,10					550	1,4	3,6	
2a T1	1,74	25,53					11669	262,7	457,1	Al/Acier rupture à l'interface; Côté avance dans alum.
2a T2	1,74	25,88					11148	247,6	430,8	Al/Acier rupture à l'interface; Côté avance dans alum.
2a T3	1,73	26,28					11525	253,5	438,5	Al/Acier rupture à l'interface; Côté avance dans alum.
Moyenne	1,74	25,90	380,3	0,4	750	0,30	11448	254,6	442,1	
Dev std	0,01	0,38					269	7,6	13,5	
3a T1	1,73	24,99					10333	239,0	413,5	Interface Al/Acier
3a T2	1,73	26,71					11142	241,1	417,1	Interface Al/Acier
3a T3	1,72	26,02					10034	224,2	385,6	Interface Al/Acier
Moyenne	1,73	25,91	357,0	0,3	1000	0,30	10503	234,8	405,4	
Dev std	0,01	0,87					573	9,2	17,2	
6a T1	1,74	25,07					11948	273,9	476,6	Bonne soudure, côté avance dans l'aluminium
6a T2	1,73	26,79					12556	270,9	468,7	Bonne soudure, côté avance dans l'aluminium
6a T3	1,73	25,98					12197	271,4	469,5	Bonne soudure, côté avance dans l'aluminium
Moyenne	1,73	25,95	127,8	1,5	500	0,75	12233	272,1	471,6	
Dev std	0,01	0,86					306	1,6	4,3	
7a T1	1,73	25,57					12573	284,2	491,7	Bonne soudure, côté avance dans l'aluminium
7a T2	1,73	26,16					12789	282,6	488,9	Matériel de base aluminium
7a T3	1,72	25,73					12443	281,2	483,6	Bonne soudure, côté avance dans l'aluminium
Moyenne	1,73	25,82	164,7	1,0	750	0,75	12601	282,7	488,0	
Dev std	0,01	0,31					175	1,5	4,1	
8a T1	1,73	26,28					11373	250,2	432,8	Microstructure modifié avance; Avance dans alu.
8a T2	1,74	26,47					11344	246,3	428,5	Microstructure modifié avance; Avance dans alu.
8a T3	1,72	25,13					10844	250,9	431,5	Microstructure modifié avance; Avance dans alu.
Moyenne	1,73	25,96	184,8	0,8	1000	0,75	11187	249,1	430,9	
Dev std	0,01	0,73					297	2,5	2,2	
9a T1	1,75	25,02					10622	242,6	424,6	Avance dans alu.; Trou de ver
9a T2	1,72	26,13					10640	236,8	407,2	Avance dans alu.; Trou de ver
9a T3	1,72	25,98					10829	242,3	416,8	Interface Al/Acier
Moyenne	1,73	25,71	172,5	0,6	1250	0,75	10697	240,6	416,2	
Dev std	0,02	0,60					115	3,3	8,7	
11a T1	1,73	26,83					12457	268,4	464,3	Interface Al/Acier
11a T2	1,73	24,15					11509	275,5	476,6	Interface Al/Acier
11a T3	1,72	26,82					12941	280,5	482,5	Interface Al/Acier
Moyenne	1,73	25,93	86,9	2,5	500	1,25	12302	274,8	474,5	
Dev std	0,01	1,54					728	6,1	9,3	
12a T1	1,74	25,29					12425	282,4	491,3	Avance dans alu.; soudure parfaite
12a T2	1,76	25,79					13205	290,9	512,0	Avance dans alu.; soudure parfaite
12a T3	1,75	25,57					12776	285,5	499,7	Avance dans alu.; soudure parfaite
Moyenne	1,75	25,55	108,0	1,7	750	1,25	12802	286,3	501,0	
Dev std	0,01	0,25					391	4,3	10,4	
13a T1	1,73	26,13					11755	260,0	449,9	Microstructure modifié avance; Avance dans alu.
13a T2	1,75	26,32					11947	259,4	453,9	Microstructure modifié avance; Avance dans alu.
13a T3	1,74	26,80					12777	274,0	476,8	Microstructure modifié avance; Avance dans alu.
Moyenne	1,74	26,42	131,8	1,3	1000	1,25	12160	264,5	460,2	
Dev std	0,01	0,35					543	8,3	14,5	
14a T1	1,74	24,80					11613	269,1	468,3	Interface Al/Acier
14a T2	1,74	26,52					12763	276,6	481,3	Microstructure modifié avance; Avance dans alu.
14a T3	1,77	26,19					12406	267,6	473,7	Microstructure modifié avance; Avance dans alu.
Moyenne	1,75	25,84	126,0	1,0	1250	1,25	12261	271,1	474,4	
Dev std	0,02	0,91					589	4,8	6,5	
15a T1	1,75	25,83					11716	259,2	453,6	Avance dans alu.; Trou de ver
15a T2	1,74	25,65					10707	239,9	417,4	Avance dans alu.; Trou de ver
15a T3	1,76	25,69					10795	238,7	420,2	Avance dans alu.; Trou de ver
Moyenne	1,75	25,72	116,6	0,8	1500	1,25	11073	245,9	430,4	
Dev std	0,01	0,09					559	11,5	20,1	
16a T1	1,74	25,42					12306	278,2	484,1	Avance dans aluminium
16a T2	1,74	25,74					12575	280,8	488,5	Avance dans aluminium
16a T3	1,73	25,95					12825	285,7	494,2	Avance dans aluminium
Moyenne	1,74	25,70	118,1	1,3	750	1,00	12569	281,6	489,0	
Dev std	0,01	0,27					260	3,8	5,1	
17a T1	1,75	25,87					12308	271,9	475,8	Interface Al/Acier
17a T2	1,75	25,10					11206	255,1	446,5	Interface Al/Acier
17a T3	1,75	25,43					11683	262,5	459,4	Interface Al/Acier
Moyenne	1,75	25,47	144,0	1,0	1000	1,00	11732	263,2	460,5	
Dev std	0,00	0,39					552	8,4	14,7	
18a T1	1,74	25,84					11331	252,0	438,5	Interface Al/Acier
18a T2	1,74	25,36					10951	248,2	431,8	Interface Al/Acier
18a T3	1,74	26,25					12980	284,2	494,5	Interface Al/Acier
Moyenne	1,74	25,82	117,4	1,2	1000	1,15	11754	261,5	454,9	
Dev std	0,00	0,45					1079	19,8	34,4	
19a T1	1,74	25,29					12677	288,1	501,3	Interface Al/Acier
19a T2	1,74	25,93					12152	269,3	468,6	Interface Al/Acier
19a T3	1,74	26,02					12909	285,1	496,1	Interface Al/Acier
Moyenne	1,74	25,75	146,3	0,9	650	0,60	12579	280,8	488,7	
Dev std	0,00	0,40					388	10,1	17,5	
20a T1	1,74	25,04					12215	280,3	487,8	Avance dans alu.; Trou de ver
20a T2	1,74	25,80					12681	282,5	491,5	Avance dans alu.; Trou de ver
20a T3	1,74	25,00					12404	285,2	496,2	Avance dans alu.; Trou de ver
Average	1,74	25,28	159,8	0,8	600	0,50	12433	282,7	491,8	
St dev	0,00	0,45					235	2,5	4,2	

Tableau A.2: Résultats des essais de traction simple des assemblages AA6082 T6/ Acier bas carbone A1008

AA6082 T6 / Acier bas carbone A1008										
Identification	Épaisseur mm	Largeur mm	Energie Spécifique J/mm	Pas d'avance mm/Rev	Vitesse de rotation RPM	Vitesse d'avance m/min	Charge maximale N	Contrainte maximale MPa	Charge normalisée N/mm	Localisation de la rupture
#1 T1	25,78	1,48					7582	198,7	294,1	ZATM Avance
#1 T2	25,84	1,48					7573	198,0	293,1	ZATM Avance
Moyenne	25,81	1,48		2,50	750	0,30	7578	198,4	293,6	
Dev std	0,04	0,00					6	0,5	0,7	
#2 T1	27,93	1,49					7754	186,3	277,6	ZATM Avance
#2 T2	23,92	1,49					7181	201,5	300,2	ZATM Avance
Moyenne	25,93	1,49		3,33	1000	0,30	7467	193,9	288,9	
Dev std	2,84	0,00					405	10,7	16,0	
#3 T1	28,44	1,51					5794	145,1	219,1	ZATM Avance
#3 T2	25,69	1,51					6216	160,2	242,0	ZATM Avance
Moyenne	26,07	1,51		4,17	1250	0,30	6005	152,7	230,5	
Dev std	0,53	0,00					298	10,7	16,1	
#4 T1	23,19	1,50					6041	173,7	260,5	ZATM Avance
#4 T2	24,42	1,50					6406	174,9	262,3	ZATM Avance
Moyenne	23,81	1,50		5,00	1500	0,30	6224	174,3	261,4	
Dev std	0,87	0,00					258	0,9	1,3	
#5 T1	25,38	1,51					5308	138,5	209,2	ZATM Avance
#5 T2	26,48	1,49					5444	138,0	205,6	ZATM Avance
Moyenne	25,93	1,50		5,83	1750	0,30	5376	138,2	207,4	
Dev std	0,78	0,01					96	0,4	2,5	
#7 T1	24,72	1,50					7295	196,7	295,1	ZATM Avance
#7 T2	25,01	1,49					8464	227,1	338,4	ZATM Avance
Moyenne	24,87	1,50		1,50	750	0,50	7879	211,9	316,9	
Dev std	0,21	0,01					837	21,5	30,6	
#8 T1	23,30	1,48					7050	204,6	302,8	ZATM Avance
#8 T2	24,11	1,49					7670	213,5	318,1	ZATM Avance
Moyenne	23,71	1,49		2,00	1000	0,50	7363	209,1	310,5	
Dev std	0,57	0,01					434	6,3	10,8	
#9 T1	24,87	1,50					6145	164,7	247,1	ZATM Avance
#9 T2	23,59	1,49					5932	168,8	251,5	ZATM Avance
Moyenne	24,23	1,50		2,50	1250	0,50	6038	166,7	249,3	
Dev std	0,91	0,01					150	2,9	3,1	
#10 T1	24,08	1,50					7502	207,7	311,5	ZATM Avance
#10 T2	24,27	1,50					6845	188,0	282,0	ZATM Avance
Moyenne	24,18	1,50		3,00	1500	0,50	7174	197,9	296,8	
Dev std	0,13	0,00					464	13,9	20,9	
#11 T1	26,45	1,51					7082	199,8	301,8	ZATM Avance
#11 T2	25,78	1,51					8016	205,9	311,0	ZATM Avance
Moyenne	26,12	1,51		3,50	1750	0,50	7999	202,9	306,4	
Dev std	0,47	0,00					24	4,3	6,5	
#12 T1	24,88	1,50					5769	154,6	231,9	ZATM Avance
#12 T2	21,51	1,50					4677	145,0	217,4	Interface Al/Acier
Moyenne	23,20	1,50		4,00	2000	0,50	5223	149,8	224,7	
Dev std	2,38	0,00					772	6,8	10,2	
#13-3 T1	24,36	1,49					3152	86,8	129,4	ZATM Avance
#13-3 T2	24,77	1,49					4352	118,7	176,9	ZATM Avance
Moyenne	24,57	1,49		1,00	750	0,75	3767	102,8	153,2	
Dev std	0,29	0,00					870	22,6	33,6	
#14 T1	24,48	1,49					4077	111,8	166,5	ZATM Avance
#14 T2	25,84	1,49					3794	98,5	146,8	ZATM Avance
Moyenne	25,16	1,49		1,33	1000	0,75	3935	105,2	156,7	
Dev std	0,96	0,00					200	9,4	13,9	
#15 T1	25,00	1,50					8084	215,6	323,4	ZATM Avance
#15 T2	24,26	1,50					7853	218,5	327,8	ZATM Avance
Moyenne	24,63	1,50		1,67	1250	0,75	8018	217,1	325,6	
Dev std	0,52	0,00					93	2,1	3,1	
#16 T1	25,00	1,48					7568	204,6	302,7	ZATM Avance
#16 T2	24,63	1,48					7612	208,8	309,1	ZATM Avance
Moyenne	24,82	1,48		2,00	1500	0,75	7590	206,7	305,9	
Dev std	0,26	0,00					31	3,0	4,5	
#17 T1	23,84	1,49					7164	201,7	300,5	ZATM Avance
#17 T2	23,75	1,50					7668	215,2	322,9	ZATM Avance
Moyenne	23,80	1,50		2,33	1750	0,75	7416	208,5	311,7	
Dev std	0,06	0,01					356	9,6	15,8	
#19 T1	25,60	1,48					7715	203,6	301,4	ZATM Avance
#19 T2	25,01	1,48					7083	191,6	283,6	ZATM Avance
Moyenne	25,31	1,48		0,75	750	1,00	7404	197,6	292,5	
Dev std	0,42	0,00					440	8,5	12,5	
#20 T1	23,57	1,49					4465	126,6	188,6	ZATM Avance
#20 T2	25,34	1,50					4809	126,5	189,8	ZATM Avance
Moyenne	24,51	1,50		1,00	1000	1,00	4637	126,6	189,2	
Dev std	1,18	0,01					243	0,1	0,8	
#21 T1	23,68	1,48					8336	237,9	352,0	ZATM Avance
#21 T2	23,64	1,50					7738	218,2	327,3	ZATM Avance
Moyenne	23,66	1,49		1,25	1250	1,00	8037	228,0	339,7	
Dev std	0,03	0,01					423	13,9	17,5	
#22 T1	24,00	1,48					7653	212,6	314,7	ZATM Avance
#22 T2	25,45	1,48					8544	226,8	335,7	ZATM Avance
Moyenne	24,73	1,48		1,50	1500	1,00	8049	219,7	325,2	
Dev std	1,03	0,00					700	10,0	14,8	
#23 T1	25,41	1,50					6241	163,7	245,6	ZATM Avance
#23 T2	25,37	1,51					7218	188,4	284,5	ZATM Avance
Moyenne	25,39	1,51		1,75	1750	1,00	6729	176,1	265,1	
Dev std	0,03	0,01					691	17,4	27,5	
#24 T1	25,09	1,49					7071	200,5	313,7	ZATM Avance
#24 T2	25,79	1,47					8676	228,8	336,4	ZATM Avance
Moyenne	25,44	1,48		2,00	2000	1,00	8273	219,7	325,0	
Dev std	0,49	0,01					570	13,0	16,1	
#25 T1	25,61	1,49					7424	194,5	289,9	Interface Al/Acier
#25 T2	28,97	1,51					7806	178,4	269,5	Interface Al/Acier
Moyenne	27,29	1,50		0,60	750	1,25	7615	186,5	279,7	
Dev std	2,38	0,01					271	11,4	14,4	
#26 T1	25,57	1,51					7330	190,0	286,9	ZATM Avance
#26 T2	23,23	1,51					6796	193,7	292,5	ZATM Avance
Moyenne	24,40	1,51		0,80	1000	1,25	7066	191,9	289,7	
Dev std	1,65	0,00					382	2,7	4,0	
#27 T1	24,74	1,50					7988	215,3	322,9	ZATM Avance
#27 T2	24,43	1,49					8789	241,5	359,8	ZATM Avance
Moyenne	24,59	1,50		1,00	1250	1,25	8389	228,4	341,3	
Dev std	0,22	0,01					466	18,5	26,1	
#28 T1	23,29	1,49					4112	118,5	176,5	ZATM Avance
#28 T2	25,43	1,49					4375	115,5	172,0	ZATM Avance
Moyenne	24,36	1,49		1,20	1500	1,25	4243	117,0	174,3	
Dev std	1,51	0,00					186	2,1	3,2	
#29 T1	24,52	1,51					7743	209,1	315,8	ZATM Avance
#29 T2	25,26	1,49					4880	129,7	193,2	ZATM Avance
Moyenne	24,89	1,50		1,40	1750	1,25	6311	169,4	254,5	
Dev std	0,52	0,01					205	96,2	86,7	
#30 T1	24,53	1,50					6809	185,1	277,6	ZATM Avance
#30 T2	23,92	1,51					6941	192,2	290,2	ZATM Avance
Moyenne	24,23	1,51		1,60	2000	1,25	6875	188,6	283,9	
Dev std	0,43	0,01					93	5,0	8,9	

Tableau A.3: Résultats des essais de traction simple des assemblages AA6082 T6/ Acier Galvanisé DP800

AA6082 T6 / Acier galvanisé DP800										
Identification	Épaisseur mm	Largeur mm	Énergie Spécifique J/mm	Pas d'avance mm/Rev	Vitesse de rotation RPM	Vitesse d'avance m/min	Charge maximale N	Contrainte maximale MPa	Charge normalisée N/mm	Localisation de la rupture
#4 T1	26,68	1,51					7714	191,5	289,1	Interface Al/Acier
#4 T2	25,02	1,52					8731	229,6	348,9	Interface Al/Acier
#4 T3	25,02	1,52					8072	212,2	322,6	Interface Al/Acier
Moyenne	25,57	1,52	1290,0	0,24	1250	0,30	8172	211,1	320,2	
Dev std	0,96	0,01					516	19,1	30,0	
#5 T1	25,13	1,52					8208	214,9	326,6	Interface Al/Acier
#5 T2	26,38	1,58					7162	171,8	271,5	Interface Al/Acier
#5 T3	25,18	1,55					8341	213,7	331,3	Interface Al/Acier
Moyenne	25,56	1,55	1134,0	0,20	1500	0,30	7904	200,1	309,8	
Dev std	0,71	0,03					646	24,5	33,3	
#8 T1	24,95	1,51					9219	244,7	369,5	ZATM (Côté retrait)
#8 T2	24,40	1,52					9069	244,5	371,7	ZATM (Côté retrait)
#8 T3	26,32	1,53					9861	239,4	366,3	ZATM (Côté retrait)
Moyenne	25,42	1,52	475,2	0,75	1000	0,75	9383	242,9	369,2	
Dev std	1,33	0,01					421	3,0	2,7	
#9 T1	23,45	1,52					8848	248,2	377,3	ZATM (Côté retrait)
#9 T2	25,98	1,55					9562	237,5	368,1	ZATM (Côté retrait)
#9 T3	24,98	1,57					9461	241,2	378,7	Interface Al/Acier
Moyenne	24,80	1,55	551,7	0,60	1250	0,75	9290	242,2	374,7	
Dev std	1,27	0,03					387	5,5	5,8	
#10 T1	24,92	1,58					8159	207,2	327,4	Interface Al/Acier
#10 T2	25,46	1,53					8774	225,2	344,6	Interface Al/Acier
#10 T3	24,94	1,54					6201	161,5	248,6	Interface Al/Acier
Moyenne	25,11	1,55	699,7	0,50	1500	0,75	7711	198,0	306,9	
Dev std	0,31	0,03					1344	32,9	51,2	
#12 T1	25,66	1,54					6157	155,8	239,9	ZATM (Côté retrait)
#12 T2	25,10	1,55					6020	154,7	239,8	ZATM (Côté retrait)
#12 T3	24,78	1,54					4832	126,6	195,0	ZATM (Côté retrait)
Moyenne	25,18	1,54	331,6	1,67	750	1,25	5670	145,7	225,2	
Dev std	0,45	0,01					729	16,6	25,9	
#13 T1	24,27	1,52					9450	256,2	389,4	ZATM (Côté retrait)
#13 T2	24,91	1,51					9470	251,8	380,2	ZATM (Côté retrait)
#13 T3	26,48	1,52					9049	224,8	341,7	Noyaux de la soudure (Côté retrait)
Moyenne	25,22	1,52	325,8	1,25	1000	1,25	9323	244,3	370,4	
Dev std	1,14	0,01					237	17,0	25,3	
#14 T1	25,11	1,54					9682	250,4	385,6	ZATM (Côté retrait)
#14 T2	25,12	1,53					9560	248,7	380,6	ZATM (Côté retrait)
#14 T3	25,19	1,60					9771	242,4	387,9	ZATM (Côté retrait)
Moyenne	25,14	1,56	360,0	1,00	1250	1,25	9671	247,2	384,7	
Dev std	0,04	0,04					106	4,2	3,7	
#15 T1	24,06	1,57					9331	247,0	387,8	ZATM (Côté retrait)
#15 T2	25,98	1,57					10099	247,6	388,7	ZATM (Côté retrait)
#15 T3	26,78	1,52					10106	248,3	377,4	ZATM (Côté retrait)
Moyenne	25,61	1,55	403,4	0,83	1500	1,25	9845	247,6	384,6	
Dev std	1,40	0,03					445	0,6	6,3	
#16 T1	24,77	1,53					7346	193,8	296,6	Interface Al/Acier
#16 T2	23,73	1,50					7991	224,5	336,7	Interface Al/Acier
#16 T3	24,76	1,51					7426	198,6	299,9	Interface Al/Acier
Moyenne	24,42	1,51		0,95	1100	1,05	7588	205,7	311,1	
Dev std	0,60	0,02					352	16,5	22,3	
#17 T1	26,09	1,54					7730	192,4	296,3	Interface Al/Acier
#17 T2	25,01	1,54					7895	205,0	315,7	Interface Al/Acier
#17 T3	24,27	1,53					7091	191,0	292,2	Interface Al/Acier
Moyenne	25,12	1,54		1,08	1300	1,40	7572	196,1	301,4	
Dev std	0,92	0,01					425	7,7	12,6	
#18 T1	24,78	1,53					6440	169,9	259,9	Interface Al/Acier
#18 T2	24,37	1,52					7407	200,0	303,9	Interface Al/Acier
#18 T3	24,20	1,50					7710	212,4	318,6	Interface Al/Acier
Moyenne	24,45	1,52		1,09	1150	1,25	7186	194,1	294,1	
Dev std	0,30	0,02					663	21,9	30,6	

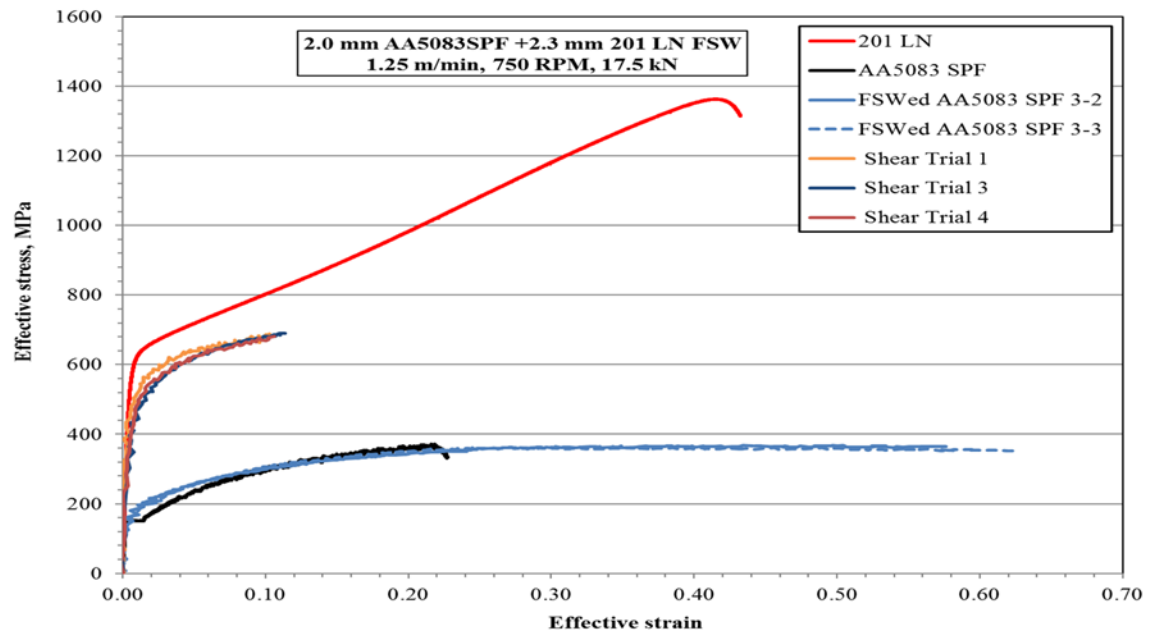


Figure A.1 : Courbe type d'essai de traction statique

## ANNEXE B

### B.1. AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur

*Tableau B.1.1: Tableau des valeurs enregistrées pendant les soudures effectuées en contrôle de position en fonction des paramètres opératoires pour les assemblages composés de AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur*

Identification	Vitesse d'avance	Vitesse de rotation	Pas d'avance	Charge appliquée	Couple	Force Y (Force dans le plan)	Force X (Transversale)	Composante de forces ( $\sqrt{[(F_x)^2 + (F_y)^2]}$ )
	m/min	RPM	mm/Rot.	kN	N-m	kN	kN	kN
#1a	0,30	500	0,60	12,3	22,1	1,4	-1,4	1,94
#2a	0,30	750	0,40	12,0	16,9	1,1	-0,8	1,36
#3a	0,30	1000	0,30	8,0	11,9	0,9	-0,6	1,08
#4	0,30	1250	0,24	7,0	9,3	1,8	-1,5	2,34
#5	0,30	1500	0,20	10,0	4,9	1,7	-1,4	2,20
#6a	0,75	500	1,50	17,0	21,3	3,2	-2,4	4,00
#7a	0,75	750	1,00	15,0	18,3	1,7	-1,1	2,02
#8a	0,75	1000	0,75	15,0	15,4	1,9	-1,3	2,30
#9a	0,75	1250	0,60	11,0	11,5	1,2	-0,9	1,43
#10	0,75	1500	0,50	14,0	9,0	2,7	-1,7	3,19
#11a	1,25	500	2,50	19,0	24,2	4,7	-2,4	5,25
#12a	1,25	750	1,67	17,5	20,0	2,8	-1,7	3,28
#13a	1,25	1000	1,25	18,0	18,3	2,7	-1,4	2,97
#14a	1,25	1250	1,00	16,0	14,0	2,2	-1,1	2,42
#15a	1,25	1500	0,83	13,0	10,8	1,6	-1,4	2,09
#16	1,00	750	1,33	15,3	17,5	2,5	-2,12	3,25
#17	1,00	1000	1,00	12,0	16,0	1,8	-1,4	2,28
#18	1,15	1000	1,15	12,0	15,0	2,0	-1,8	2,69
#19	0,60	650	0,92	10,5	15,0	1,9	-1,5	2,38
#20	0,50	600	0,83	11,0	14,8	1,8	-1,7	2,44

Tableau B.1.2: Commentaires des soudures effectuées en contrôle de position à la suite de l'analyse visuelle pour les assemblages composés de AA5083 SPF / Acier inoxydable 201LN ¼ dur

Identification	Commentaires
#1a	Soudure saine; petits trous de ver acceptables à l'interface
#2a	Soudure saine; trous de ver à l'interface acceptables
#3a	Trou de ver du côté avance de la soudure
#4	Défauts de surface
#5	Défauts de surface
#6a	Soudure saine
#7a	Trou de ver du côté retrait et continuité ligne de joint du côté avance; Acceptable
#8a	Pliage déficient; microstructure modifiée côté avance
#9a	Trou de ver côté avance
#10	Défauts de surface
#11a	Soudure saine; petits trous de ver acceptables à l'interface
#12a	Soudure parfaite sans défauts
#13a	Pliage déficient; microstructure modifiée côté avance
#14a	Soudure saine; microstructure modifiée côté avance
#15a	Pliage déficient; trou de ver côté avance
#16	Petit wormhole côté retrait; acceptable
#17	Ok, mais remontée d'acier côté avance assez prononcée
#18	Soudure excellente
#19	Soudure parfaite
#20	Trous de ver à l'interface



## B.2. AA6082 T6 / Acier galvanisé DP800

Tableau B.2.1: Tableau des valeurs enregistrées pendant les soudures effectuées en contrôle de position en fonction des paramètres opératoires pour les assemblages composés de AA6082 T6 / Acier galvanisé DP800

Identification	Vitesse d'avance	Vitesse de rotation	Pas d'avance	Charge appliquée	Couple	Force Y (Force dans le plan)	Force X (Transversale)	Composante de forces ( $\sqrt{[(F_x)^2 + (F_y)^2]}$ )
	m/min	RPM	mm/Rot.	kN	N-m	kN	kN	kN
#2a	0,30	750	0,40	10,20	45,3	1,9	-1,0	2,2
#3a	0,30	1000	0,30	9,40	39,6	0,5	-0,6	0,8
#4a	0,30	1250	0,24	8,20	34,4	0,5	-0,7	0,8
#5a	0,30	1500	0,20	6,00	25,2	0,5	-0,8	0,9
#7-5	0,75	750	1,00	20,00	50,2	4,0	-2,3	4,6
#8-2	0,75	1000	0,75	13,90	39,6	1,7	-1,4	2,2
#9-2	0,75	1250	0,60	12,40	36,8	1,5	-1,1	1,9
#10-2	0,75	1500	0,50	10,70	38,9	1,6	-1,1	2,0
#12-2	1,25	750	1,67	25,00	61,4	5,1	-1,8	5,4
#13-2	1,25	1000	1,25	22,00	45,3	3,3	-1,7	3,7
#14-2	1,25	1250	1,00	17,50	40,0	1,7	-1,1	2,0
#15-2	1,25	1500	0,83	14,50	37,4	1,8	-1,0	2,1
#16	1,05	1100	0,95	14,80	48,0	3,0	-1,4	3,3
#17	1,40	1300	1,08	16,00	50,0	1,9	-1,1	2,2
#18	1,25	1150	1,09	16,00	49,0	2,2	-1,3	2,6

Tableau B.2.2: Commentaires des soudures effectuées en contrôle de position à la suite de l'analyse visuelle pour les assemblages composés de AA6082 T6 / Acier galvanisé DP800

Identification	Commentaires
#2a	Trou de ver sur le côté avance de la soudure
#3a	Soudure saine; peu de remonté d'acier
#4a	Soudure saine mais réaction à l'interface dû au Zn
#5a	Soudure saine mais déformation importante de l'interface (trop chaud)
#7-5	Soudure saine avec quelques remontés d'acier
#8-2	Soudure saine mais haute remontée d'acier (côté retrait)
#9-2	Soudure saine mais haute remontée d'acier (côté retrait)
#10-2	Soudure saine mais haute remontée d'acier (côté retrait) & réaction à l'interface (Zn)
#12-2	Soudure avec défauts
#13-2	Soudure saine & couche de Zn à l'interface semble être conservé
#14-2	Très haute remontée d'acier (côté retrait) & Zn remonte dans Al
#15-2	Haute remontée d'acier (côté retrait) & réaction à l'interface (Zn)
#16	Relativement haute remontée d'acier (côté retrait) & quelques trou de ver
#17	Haute remontée d'acier (côté retrait)
#18	Relativement haute remontée d'acier (côté retrait) & quelques trou de ver

### B.3. AA6082 T6 / Acier bas carbone A1008

Tableau B.3.1: Tableau des valeurs enregistrées pendant les soudures effectuées en contrôle de position en fonction des paramètres opératoires pour les assemblages composés de AA6082 T6 / Acier bas carbone A1008

Identification	Vitesse d'avance	Vitesse de rotation	Pas d'avance	Charge appliquée	Couple	Force Y (Force dans le plan)	Force X (Transversale)	Composante de forces ( $\sqrt{[(Fx)^2 + (Fy)^2]}$ )
	m/min	RPM	mm/Rot.	kN	N-m	kN	kN	kN
#1	0,30	750	0,40	7,3	82,00	1,60	-1,60	2,26
#2	0,30	1000	0,30	4,8	80,00	1,50	-1,40	2,05
#3	0,30	1250	0,24	5,4	43,00	0,90	-0,90	1,27
#4	0,30	1500	0,20	4,8	37,00	0,80	-1,70	1,88
#5	0,30	1750	0,17	4,0	35,00	0,60	-1,80	1,90
#7	0,50	750	0,67	6,7	90,00	2,50	-2,30	3,40
#8	0,50	1000	0,50	8,4	60,00	1,80	-1,60	2,41
#9	0,50	1250	0,40	7,0	46,00	1,90	-1,40	2,36
#10	0,50	1500	0,33	5,6	40,00	0,90	-1,20	1,50
#11	0,50	1750	0,29	5,5	36,00	0,50	-1,20	1,30
#12	0,50	2000	0,25	4,9	35,00	0,50	-1,30	1,39
#13	0,75	750	1,00	9,0	78,00	3,60	-2,50	4,38
#14	0,75	1000	0,75	7,0	66,00	2,00	-1,90	2,76
#15	0,75	1250	0,60	7,0	48,00	2,20	-1,50	2,66
#16	0,75	1500	0,50	7,5	43,00	1,50	-1,50	2,12
#17	0,75	1750	0,43	5,6	36,00	1,00	-1,00	1,41
#19	1,00	750	1,33	4,8	89,00	4,00	-2,40	4,66
#20	1,00	1000	1,00	12,5	67,00	3,10	-2,20	3,80
#21	1,00	1250	0,80	8,2	50,00	2,00	-1,60	2,56
#22	1,00	1500	0,67	8,0	40,00	2,30	-1,30	2,64
#23	1,00	1750	0,57	7,2	39,00	1,80	-1,65	2,44
#24	1,00	2000	0,50	7,0	38,00	1,40	-1,40	1,98
#25	1,25	750	1,67	5,5	87,00	5,30	-2,80	5,99
#26	1,25	1000	1,25	14,0	68,00	3,70	-2,30	4,36
#27	1,25	1250	1,00	10,6	56,00	2,60	-1,90	3,22
#28	1,25	1500	0,83	10,2	44,00	2,50	-1,70	3,02
#29	1,25	1750	0,71	8,2	40,00	2,40	-1,70	2,94
#30	1,25	2000	0,63	7,3	38,00	2,20	-1,40	2,61

Tableau B.3.2: Commentaires des soudures effectuées en contrôle de position à la suite de l'analyse visuelle pour les assemblages composés de AA6082 T6 / Acier bas carbone A1008

Identification	Commentaires
#1	Trou de ver à l'interface
#2	Petits trous de ver à l'interface et côté retrait
#3	Malaxage important
#4	malaxage et remontée d'acier important du côté avance
#5	Beaucoup de remontée d'acier
#7	Petits trous de ver acceptables
#8	Trou de ver et remontée d'acier côté retrait
#9	Trou de ver au centre
#10	Acceptable
#11	Acceptable
#12	Initiation d'une fissure à l'interface côté avance
#13	Kissing-bond côté avance
#14	Kissing-bond côté avance
#15	Remontée d'acier côté retrait/décohésion entre ZATM et ZAT côté avance
#16	Trou de ver à l'interface
#17	Acceptable
#19	Inacceptable gros trous de ver
#20	Kissing-bond côté avance
#21	Remontée d'acier côté retrait
#22	Trou de ver et remontée d'acier côté retrait
#23	Kissing-bond et trou de ver côté avance
#24	Défaut de surface et interface propre
#25	Défauts volumétriques importants et trou de ver côté retrait
#26	Trou de ver
#27	Petits trous de ver acceptables
#28	Décohésion côté avance
#29	Petits trous de ver acceptables côté avance
#30	Interface saine

## ANNEXE C Explications des forces de la machine

Le type de soudeuse qui est utilisée dans cette recherche est instrumenté de plusieurs capteurs qui mesurent différentes grandeurs. Ces capteurs sont tous électroniques ce qui donne des lectures en Volts qui sont par la suite transformées par le système d'acquisition de données de l'équipement. Couplé à un ordinateur, ce système fournit plusieurs mesures cruciales dans l'unité de mesure désirée. Les forces de rétroaction des trois axes principaux d'une soudure peuvent donc être obtenues en temps réel pour rendre compte des conditions de vie de l'outil que provoquent les paramètres opératoires et ainsi pouvoir quantifier en termes d'unités de mesure connues ces conditions de vie. On entend ici par conditions de vie, les forces appliquées à l'outil dans les trois directions principales du plan cartésien.

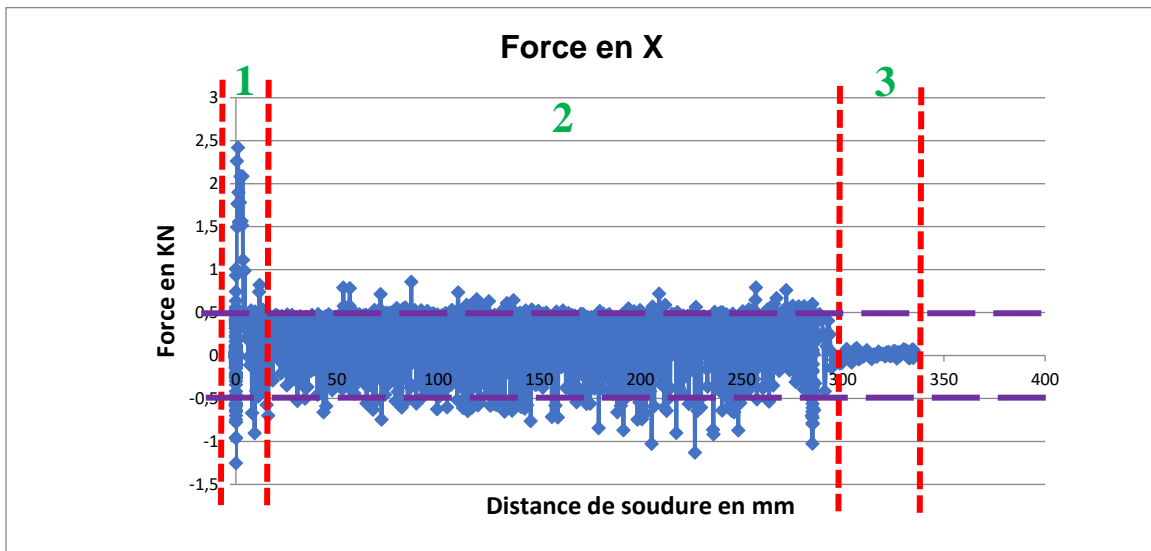


Figure C.1: Graphique de la force latérale en X d'une soudure à recouvrement d'une plaque de AA6082-T6 sur du DP800 galvanisé; 0,3 m/min et 1500 RPM

Une variation de force dans une soudure par friction-malaxage est normale puisque la température entre le côté avance et recul varie elle aussi. Une augmentation de la température des matériaux influence nécessairement les propriétés mécaniques des ceux-ci. De ce fait, il est évident qu'une variation de température entre le côté avance et le côté recul provoque une variation des propriétés mécaniques entre ces deux côtés. Avec une fréquence d'acquisition relativement élevée par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, il est possible de lire cette variation de force provoquée par la

rencontre de l'outil avec un côté (côté avance) qui a tendance à avoir plus de déformations et l'autre côté (côté recul) qui est plus froid et donc qui nécessite plus d'énergie pour se déformer ce qui provoque nécessairement une augmentation de la force latérale locale. On peut voir ce phénomène sur la figure C.1 où il y a une variation marquée de forces latérales mesurées dans la zone 2 du graphique. Les lignes situées à 0,5 KN et à -0,5 KN sont présentes pour illustrer que la force du côté recul de la soudure est en moyenne légèrement plus basse que -0,5 KN. Comparativement aux forces du côté avance de la soudure, elles sont en moyenne situées sur la ligne de 0,5 KN. Les zones 1 et 3 du graphique sont respectivement la phase de plongée de l'outil et la fin de la soudure. Ces phases sont des périodes d'attentes pour la stabilisation de l'outil ce qui provoque beaucoup de variations ou de constance dans le cas de la fin de la soudure.

Il est important de noter que les forces mesurées par les capteurs sont seulement des variations de forces.

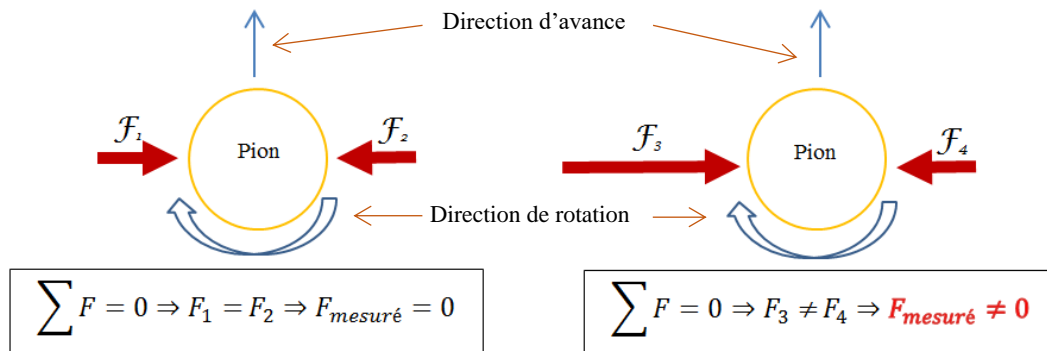


Figure C.2: Schématisation de la mesure des forces latérales lors du soudage

La figure C.2 est une schématisation de la mesure de la force latérale lors du soudage. Lorsqu'un graphique comme la figure C.1 exprime les mesures d'un capteur de forces, il ne faut pas conclure que ceux-ci sont les forces réellement appliquées sur la géométrie puisque ce capteur mesure uniquement une différence de force. Les forces appliquées étant un élément vectoriel, il faut considérer le lieu de son application, sa direction et sa grandeur d'où l'intérêt de mentionner que

les forces peuvent être grandes et s'appliquer de part et d'autre de l'outil, il faut comprendre qu'il est possible que ces forces s'annulent en étant appliquées en même temps et dans le même axe, mais dans des directions opposées.